

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт экологии и географии
Кафедра экологии и природопользования

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ И.Н. Безкоровайная
подпись
« ____ » _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Сравнительный анализ картографирования лесного покрова спутниковыми и
наземными методами на примере горной территории

05.03.06 - экология и природопользование
05.04.06.05 – Экология северных нефтегазоносных провинций

Руководитель,	канд. техн. наук	_____	Е.И. Пономарев
		подпись, дата	инициалы, фамилия
Выпускник,	ЭБ16-05М	_____	А.А. Карсаков
	номер группы	подпись, дата	инициалы, фамилия
Рецензент	д-р биол. наук	_____	Д.И. Назимова
		подпись, дата	
Нормоконтролер		_____	О.С. Бухно
		подпись, дата	инициалы, фамилия

Красноярск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Район исследования	5
1. Обзор методов исследования.....	10
1.1 Методы картографирования.....	10
1.2 Современные спутниковые данные в задаче картографирования	14
1.3 Математические методы обработки изображений	19
1.4 Средства ГИС для анализа, вычислений и картографии.....	23
2 Методика работы.....	26
3 Результаты наземных исследований	31
4 Результаты дистанционных исследований.....	41
ВЫВОДЫ.....	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	52

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в регионах Сибири наблюдается усиление антропогенной деятельности: рубок, строительства, сельскохозяйственного использования, а также увеличения количества пожаров [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7]. Это может повлечь ряд последствий в т.ч. изменения функционирования лесного покрова, трансформацию ландшафтов и смещению границ лесных сообществ. Некоторые изменения можно наблюдать в регионах Сибири [8; 9]. Среди них горная территория Танзыбейского участкового лесничества (Приенисейских Саян), где достаточно хорошо выражена высотная зональность, регион представляет интерес своим разнообразием лесной растительности [10]. Ввиду горного характера ландшафтов, натурные исследования данной территории затруднены. Выявить и анализировать структуру растительного покрова в целом, а также происходящие в нем изменения стало возможно с помощью спутникового мониторинга, который позволяет обеспечить охват большой территории, а также получить качественную и количественную оценку растительных сообществ на локальном, региональном и глобальном уровне. На данный момент наблюдается дефицит картографических материалов, отражающих современную картину и географию лесного покрова в связи с актуальным влиянием антропогенного фактора [11; 12; 13].

Выбор района работ определяется присутствием различных природных комплексов в рамках высотной поясности, где представлено широкое разнообразие растительного покрова. А также наличием исходных данных - разномасштабных материалов наземных исследований за разные годы, начиная с 1960х годов до последних лет и спутниковых материалов, получаемых в последние годы (с 2000-х до 2017 г).

Была сформулирована следующая цель работы: актуализировать пространственную структуру классов растительности горной лесной территории путем натурных и дистанционных методов картографирования на примере ключевого участка – предгорий и северного макро-склона Западного Саяна.

Для достижения цели поставлены задачи:

1. выполнить сопряженный анализ, характеризующий состояние репрезентативных ландшафтов, на основе данных наземных обследований и тематической обработки спутниковых материалов;
2. разработать метод тематического дешифрирования эколого-фитоценологических комплексов растительного покрова горных ландшафтов на основе многоспектральных спутниковых данных;
3. оценить эффективность применения данных спутниковой информации для мониторинга ландшафтов и изучения растительного покрова;
4. провести мониторинг сезонно-фенологической динамики Танзыбейского участкового лесничества посредством отображения пространственно-временных вариаций на серии спутниковой съемки.

Район исследования

Географическое положение района исследования находится в диапазоне от 52°46'0,0" с.ш. до 53°17'0,0" с.ш по широте и от 92°43'0,0" в.д. до 93°18'0,0" в.д. по долготе. Исследуемая территория относится к северо-восточной части Западного Саяна. Этот район был отнесен к Джебашско-Амыльскому округу черневых и горно-таежных пихтовых и кедрово-пихтовых лесов северной Алтае-Саянской растительной области [14; 15]. Площадь района исследований дистанционными методами, составляет 154 тыс. га, протяженность 380 км. Наземные изучения были проведены в окрестностях стационара «Ермаковский», на прилегающей территории заложено пять пробных площадей (рисунок 1).

Ермаковский стационар расположен на юге Красноярского края в 74 км. юго-восточнее центра южного округа Красноярского края – города Минусинска на федеральной автотрассе Р257.



Рисунок 1 – Местоположение полигона исследования на карте РФ

Данная территория характеризуется выраженной высотной поясностью растительности и ландшафтов в целом, высоким биоразнообразием, в том числе уникальным составом лесной растительности поэтому представляет большой научный и практический интерес для последующего многолетнего мониторинга.

Полигон-трансект Ермаковского стационара имеет северную границу на макросклоне Западного Саяна, в предгорьях хребта Кулумыс, межгорной заболоченной Танзыбейской котловине (междуречье рек Малого Кебежа и Танзыбея), абсолютная высота – 350 м. над уровнем моря. С севера ограничен Китаевой горой и долиной р. Черная речка. На восток простираются заболоченная долина р. Большой Кебеж, на запад – долина р. Танзыбей, к югу – отроги Кулумысского хребта Западного Саяна, переходящие в среднегорье и высокогорье абсолютной высотой до 1800 м. Протяженность полигона более 50 км с севера на юг, что оказалось вполне достаточно для четкого проявления высотной поясности.

Растительность представляет собой преимущественно темнохвойную черневую тайгу на высотах 800-1300 м и черневые смешанные леса на высоте 350-800 м. В низкогорье, до 500 м, кроме темнохвойных кедрово-пихтовых лесов, широко представлены производные мелколиственные леса: осинники и березняки, обширны заболоченные участки, луга. Севернее начинается пояс подтайги из сосновых и смешанных лесов. Характерной особенностью хвойных лесов Западного Саяна является то, что они формируют отличающийся значительной вертикальной протяженностью темнохвойный пояс [16; 17; 18].

Таблица 1 – Характеристика классов ВПК лесопользования на юге Красноярского края

КЛАСС ВПК	Состав лесообразователей, класс бонитета	Показатели разнообразия:	Целевые системы лесного хозяйства
ЛЕСОСТЕПНОЙ 2000-1300⁰; 0,5-0,9; 400-550 мм	Светлохвойные и березовые леса, в долинах тополевики, местами участие ели, II-IV	Разнотравные и кустарниковые остепненные, осочково-орляковые, 25-45 видов Аспекты весной зеленый, желтый и фиолетовый	Горно-лесостепная поле- и почвозащитная
ПОДТАЕЖНЫЙ 1900 -1600⁰; 0,9-1,2; 450-650 мм	Лиственные и светлохвойные леса из сосны, лиственницы, березы, осины. I-III	Орляково-осочковая, крупнотравная, разнотравно-вейниковая, зеленомошно-бруснично-разнотравная. 20-60 видов.	Низкогорная поле- и почвозащитная
ГОРНО-ЧЕРНЕВОЙ 1650-1150⁰; 1,2-2,8; 560-1200 мм	Темнохвойные и смешанные леса из пихты, осины и кедра, I-III		Горно-черневая плантационная
ГОРНО-ТАЕЖНЫЙ ТЕМНОХВОЙНЫ Й 1300-600⁰; 1,2-3,0; 500-1300 мм	Темнохвойные массивы из кедра, пихты, с примесью ели, II-IV	Травяно-зеленомошные с вейником тупоколосковым и папоротниками (щитовники, диплазиум) 12-25 видов. Аспекты не выражены.	Горно-таежная эксплуатационно-защитная
ПОДГОЛЬЦОВО-СУБАЛЬПЫЙСКИ Й 700-250⁰; 2.8-4.2; 800-1500 мм	Кедровые, пихтовые леса и редколесья вдоль верхней границы леса, IV-Vб		Подгольцово-высокогорная снегосборно – водорегулирующая строго защитная

В местности очень густая гидрографическая сеть. Кроме двух основных рек – Танзыбей и Малый Кебеж, в ближайших окрестностях есть множество других рек, ручьёв, родников. В 5 км на восток расположена более крупная река – Большой Кебеж. Главная река, вдоль которой протянулся посёлок Тан-

зыбей с юга на север на 6 км – Малый Кебеж. Другая важная река – Танзыбей – лишь слегка касается населённого пункта на северо-западе и впадает на севере посёлка в р. Малый Кебеж [19; 20].

С 1960 г. на Ермаковском стационаре Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) специалистами различных направлений на эколого-географической основе ведутся исследования разнообразия и долговременной динамики коренных кедровников, пихтарников и производных от них насаждений. Комплексные лесоводственно-экологические исследования охватывают высотный профиль от подтаежных лесов до подгольцово-субальпийских редколесий (от 350–500 до 1300–1500 м над ур. м.), в пределах которого авторами выделены четыре высотно-поясных комплекса (ВПК) типов леса. Этот спектр ВПК в полной мере характеризует наветренные склоны Алтае-Саянской горной области с избыточно влажным климатом [21]. Кроме того, он включает уникальные, свойственные только барьерно-дождевым ландшафтам гор виды и сообщества, представляющие особый интерес для изучения их биоразнообразия и динамики.

В ходе предшествующих исследований в 1970–2000 гг. территория была охвачена наземным лесоустройством, проведенным, с использованием лесоводственно-типологических материалов и схем типов леса, разработанных для данного региона. В итоге были созданы база данных и геоинформационная система (ГИС) на всю территорию Танзыбейского участкового лесничества (148 тыс. га), что позволяет изучать закономерности пространственно-структурной организации лесного покрова в горах, используя принципиально новый уровень знаний о территории и возможности дистанционных методов исследования.

Характерной особенностью хвойных лесов Западного Саяна является то, что они формируют отличающийся значительной вертикальной протяженностью темнохвойный пояс, с господством всего двух главных пород – пихты и кедра. Но он не остается однообразным по составу типов леса, возможна дифференциация на низкогорный черневой, среднегорный черневой и таежно-

черневой, горно-таежный преимущественно пихтовый и субальпийский пихтово-кедровый с участием субальпийских лугов и кустарников.

1. Обзор методов исследования

1.1 Методы картографирования

Чтобы уметь правильно выбирать способы изображения для того или иного экологического процесса, необходимо хорошо представлять возможности и пределы применения каждого способа картографирования.

Способ линейных знаков используется для передачи линий в их геометрическом понимании: границ, береговых линий, тектонических нарушений. Необходимо отметить особенность способа линейных знаков: он должен показывать либо линии, реально существующие в природе (например, дороги), либо линии протяженности вытянутых статичных или динамичных объектов (хребты на орографических схемах, линии фронта). Перемещение динамичных объектов (например, атмосферных фронтов) можно передавать системой линейных знаков, отнесенных к разным датам. В целом линейные знаки как способ изображения следует отличать от линий как изобразительных средств, относящихся к другим способам изображений (изолинии, границы ареалов и выделов).

В экологическом картографировании способ линейных знаков употребляют для показа линейных источников воздействия на окружающую среду: автомобильных и железных дорог, трубопроводов, ЛЭП и иных транспортных коммуникаций, а также линейно вытянутых реципиентов воздействий, таких как реки, в том числе с характеристикой качества воды и состояния экосистем [22; 23].

Способ качественного фона используется для качественной характеристики явлений сплошного (почвы, геологическое строение, ландшафты) или, реже, рассеянного распространения (население, народы). При его использовании территория делится на качественно однородные контуры (выделы), которые окрашиваются или штрихуются в соответствии с качественной характеристикой.

Графическим средством в данном способе могут служить цвет (ровные фоновые окраски разных цветовых тонов, разных степеней светлоты, насыщенности), полутона, маркировка различных рисунков и интенсивности, заполняющие обозначения, буквенные и цифровые индексы (но из-за малой наглядности они широкого распространения не получили и применяются главным образом как дополнительное обозначение, разновидность пояснительной подписи).

В экологическом картографировании способ качественного фона один из самых употребительных. Он образует основное содержание на картах оценки экологических ситуаций, используется на комплексных экологических картах для показа распространения ландшафтов и характера использования земель, устойчивости ландшафтов к техногенным нагрузкам и т.п. [24; 25].

Способ количественного фона применяется для показа количественных характеристик. Однако в природе практически отсутствуют такие явления, которые имели бы одинаковые количественные значения в пределах каких-то контуров и резко меняли их на границах.

Способ изолиний. Изолинии, т.е. линии, соединяющие точки с одинаковыми значениями каких-либо количественных показателей, используются для количественной характеристики сплошных и постепенно изменяющихся в пространстве явлений, таких как температура воздуха, количество осадков, рельеф. С точки зрения использования изобразительных средств здесь преобладают линии различных структур, цветов и ширины, и площадные фоны для послойной окраски промежутков между определенными изолиниями – ровные фоновые окраски либо штриховки на черно-белых картах.

К числу достоинств способа изолиний также относится его простота и доступность. На картах, построенных с помощью данного способа, легенды бывают очень просты по содержанию и обычно сводятся к шкалам.

Способ изолиний очень удобен для применения количественных методов обработки, преобразования и анализа картографических изображений: определения характеристик заданных контрольных точек и расчета статисти-

ческих зависимостей и эмпирических уравнений, сложения и вычитания изолиний, разложения на составляющие и др. Поэтому с помощью данного способа могут передаваться и явления, по своему содержанию неподходящие или малоподходящие для данного способа.

В экологическом картографировании способ изолиний – один из наиболее употребительных. С его помощью картируют многочисленные физико-географические параметры, частные и общие количественные характеристики загрязнения и устойчивости компонентов природной среды к загрязнению, интенсивность геодинамических процессов и др. [26; 27].

Способ ареалов используется для передачи области распространения явлений, имеющих ограниченное по площади распространение, причем в пределах этой площади картографируемое явление может быть дискретным (т.е. встречаться в изолированных пунктах и на участках), сплошным или рассеянным. Главное отличие способа ареалов от способа качественного фона: во-первых, тип локализации, во-вторых, – необязательность рисовки границ. По отношению к используемым условным обозначениям способ ареалов универсален: он может быть реализован с помощью немасштабных рисунков (не имеющих четкой координатной привязки), линейных или площадных обозначений и даже буквенно-цифровых индексов.

В экологическом картографировании способ ареалов применяется по своему прямому назначению: для показа ареалов биологических видов, особо охраняемых природных территорий, участков распространения определенных видов загрязнения, геодинамических процессов [28; 29].

Точечный способ используется для передачи явлений рассеянного распространения (сельское население, поголовье скота, посевные площади). Изобразительным средством является множество точек одинакового размера, каждая из которых имеет определенный «вес» – значение количественного показателя.

В экологическом картографировании точечный способ пока практически не нашел применения. Возможно его использование для показа распространения редких и охраняемых либо опасных для человека видов.

1.2 Современные спутниковые данные в задаче картографирования

Обработка спутниковых снимков способна выявлять различные характеристики земной поверхности, такие как: определение преобладающего минерального состава открытых горных пород, выявление плотности и степени нарушенности растительного покрова, преобладающего видового состава и плотности насаждений лесов, создания карт температуры воздуха, земной поверхности и поверхности водных объектов, определения влажности и минерального состава почвы, выявления пятен антропогенных загрязнений на суше и море, определение территорий с лесными пожарами, горящими, нелегальными вырубками и многое другое [30; 31; 32; 33; 34].

Выявление характеристик земной поверхности реализуется посредством использования специального программного обеспечения (ПО) по обработке спутниковых снимков, наиболее известные из которых – ENVI и ERDAS IMAGINE. ENVI – программный продукт для визуализации и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), который включает в себя набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и её интеграции с данными ГИС. А ERDAS IMAGINE это растровый графический редактор и программный продукт, первоначально разработанный компанией ERDAS Inc., и предназначенный для обработки данных дистанционного зондирования (в основном, данных ДЗЗ) [35].

Работа в этих программах часто идет в сопряжении с работой в программах ГИС, например, ENVI имеет специальные опции, рассчитанные на сопряженную работу с ArcGIS (ArcGIS — семейство геоинформационных программных продуктов американской компании ESRI). Однако, все коммерческие ПО, - довольно дорогие. Существует хорошая альтернатива – выбор и открытого (бесплатного) ПО, которое также позволяет вести обработку спутниковых снимков и сопряженную ГИС работу (GRASS, QGIS, др).

Для понимания основ технологий дистанционного зондирования, и, в том числе, принципов обработки спутниковых снимков с целью выявления характеристик земной поверхности, необходимо понимать ряд технических особенностей функционирования спутников.

Sentinel-2 – европейский спутник дистанционного зондирования Земли, который входит в космическую группировку спутников по Глобальному мониторингу окружающей среды и безопасности «Copernicus».

«Copernicus» является одной из крупнейших в мире программой наблюдения Земли под руководством Европейским космическим агентством. Успешно функционирует с 2015 года Sentinel-2, который будет обеспечивать работу наземных и экстренных служб. 16 января 2016 года с российского космодрома был запущен спутник Sentinel-3, главной целью которого является глобальный мониторинг океана. Кроме этого до 2021 года планируется вывести на орбиту спутники Sentinel-4, Sentinel-5 и Sentinel-6.

На данный момент в свободном доступе находится информация только с первого спутника в режиме реального времени, бесплатно для всех пользователей, включая широкую общественность, научных и коммерческих пользователей. К концу апреля 2016 года, более чем 32000 пользователей было зарегистрировано, и более 4 миллионов скачиваний продуктов были сделаны пользователями, это составляет около 5 PB (петабайт) данных. Более 500000 продуктов доступны в Интернете на данный момент по адресу <https://scihub.copernicus.eu/dhus/№/home> [36; 37].

Landsat является самой продолжительной космической программой для приобретения спутниковых снимков Земли. Первый спутник был запущен 23 июля 1972 года, а последний – Landsat 8 11 февраля 2013 года.

Миссия Landsat 8 состоит из трех основных задач:

1. Сбор и архивация многоспектральных комических снимков среднего пространственного разрешения (30 м) для мониторинга глобальных процессов на срок не менее 5 лет;

2. Убедиться, что данные Landsat 8 в достаточной степени согласуется с данными более ранних спутников Landsat с точки зрения геометрии, калибровки, характеристик покрытия, спектральных характеристик, качества выпускаемой продукции, и наличия данных, позволяющих исследовать почвенно-растительный покров в течение времени;

3. Распространить продукты спутника Landsat 8 для широкой общественности на недискриминационной основе без каких-либо затрат для пользователя.

За время работы программа Landsat зафиксировала миллионы изображений, которые используются в области сельского хозяйства, картографии [38], геологии, лесного хозяйства [39], образования [40], моделирования и прогнозирования [41].

Landsat 8 получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем ИК и в дальнем ИК, с разрешением снимков от 15 до 100 метров на точку. В сутки снимается порядка 400 сцен (для Landsat-7 всего 250 сцен в день). Сенсоры OLI и TIRS имеют более высокое отношение сигнал-шум (SNR) и снимать до 12 бит на точку. Каждый снимок Landsat сцена около 115 миль в длину и ширину 115 миль [42].

Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) это транснациональный научно-исследовательский спутник на солнечно-синхронной орбите вокруг Земли, действующий под руководством агентства NASA.

Terra несёт на борту пять дистанционных зондов для наблюдения за окружающей средой и изменениями климата: ASTER, CERES, MISR, MOPITT и MODIS, фотографирующий в 36 диапазонах спектра, с длиной волны от 0,4 мкм до 14,4 мкм и разрешением от 250 м до 1 км. MODIS предназначен для наблюдения за глобальной динамикой планеты Земли, например, изменения облачности, радиационный баланс и процессы, происходящие в океанах и в нижних слоях атмосферы.

Снимки MODIS распространяются бесплатно через Интернет-портал EOS Data Gateway (http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims_welcome), систему архивов NASA, архивы многих наземных станций.

«Ресурс-П» – серия российских гражданских космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, являющихся развитием проекта «Ресурс-ДК1». Головной разработчик: ОАО РКЦ «Прогресс». Оператор: НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы». Всего было запущено три спутника «Ресурс-П». При составлении и редактировании карт будут использоваться данные, полученные с этих спутников. Кроме этого, полученная с них информация будет полезна при проведении мероприятий контроля окружающей среды, и при поиске потенциальных мест залегания нефти и других полезных ископаемых. Также, при исследовании спутниковых снимков в различных спектральных диапазонах можно будет определять зрелость злаковых на полях, и уровень засоленности почвы.

Таблица 2 – Сравнение технических характеристик спутников

Название спутника	Sentinel-2	Landsat 8	Terra MODIS	Ресурс-П
Даты запуска	2013-2016	2013	1999	2013
Оператор	Европейское космическое агентство	NASA	NASA	Роскосмос
Масса, кг	2280	2623	4864	6275
Высота орбиты, км	693	705	701	475
Срок службы	7 лет	5-10 лет	6 лет	5 лет
Спектральный диапазон	3,6-14,3 мкм	10,6-11,2 мкм	4-14,4 мкм	0,5-0,9 мкм
Периодичность съемки, сутки	1-3	16	1-2	2-3
Пространственное разрешение, м	10	30-100	250-1000	0,7 м
Информативность применимость детальность	Локальные, региональный, субрегиональный уровень	Региональный, субрегиональный уровень	Глобальный, региональный уровень	Локальные, региональный, субрегиональный уровень

«Ресурс-П» № 1 был выведен на орбиту 25 июня 2013 года, «Ресурс-П» № 2 – 26 декабря 2014 года, а «Ресурс-П» № 3 выведен на орбиту в резервную дату 13 марта 2016 года.

По качественным параметрам передаваемых изображений, Ресурс-П не уступает зарубежным космическим аппаратам, например, Ikonos-2 (США), запущенному в 1999 году, и двум аппаратам Pleiades (Франция), запущенным в 2011 и 2012 годах [43].

В таблице 2 нами были систематизированы технические характеристики спутников [44; 45; 46; 47; 48].

1.3 Математические методы обработки изображений

Существует несколько методов обработки и классификации изображений.

1. Максимальное правдоподобие.

Распознавание по методу максимального правдоподобия (МП) учитывает достаточно большой объем статистических данных и успешно справляется со сложными задачами. При справедливости предположения о нормальном законе распределения вектора метод МП обеспечивает оптимальное распознавание. Однако, как можно заключить из сказанного выше, этот метод требует достаточно большого количества операций и является сравнительно медленным. Было бы желательно, чтобы при использовании метода МП в обработке изображений учитывались не только яркости в спектральных каналах для каждого одиночного пиксела (попиксельная классификация), но и его окружение. К сожалению, такой учет приводит к еще большему замедлению процесса распознавания и на практике пока применяется редко. Поэтому в некоторых случаях рассматриваемый вариант метода МП по качеству распознавания проигрывает более простым методам, которые принимают во внимание взаимные связи соседних пикселей. Причиной неверной классификации могут быть также завышенные значения [49].

2. Минимальное расстояние.

Это самый простой и быстрый метод классификации, он требует минимальных сведений о классах, но уступает методу максимального правдоподобия в точности классификации. Метод минимальных расстояний не учитывает окружения пиксела, поэтому, как правило, уступает и методам кластерного анализа, и методам сегментации по наращиванию областей и по выделению границ. Метод минимальных расстояний основан на евклидовой метрике и может рассматриваться безотносительно нормального закона распределения.

3. Расстояние Махаланобиса

Метод расстояния Махаланобиса схож с методом минимального расстояния, отличие заключается в том, что в выражении используется ковариационная матрица [50].

Метод допускает переменные классы в отличие от метода минимальных расстояний, это позволяет избежать появления неклассифицированных пикселей. Однако использование этого метода требует затраты большего количества времени и требует большой точности в выборе обучаемых данных. Метод может быть полезнее метода минимальных расстояний в случае, когда должен быть введен статистический критерий, но использование в расчетах весового фактора не необходимо.

Непараметрические правила:

Правило параллелепипеда.

На практике находит применение ещё один простой метод классификации, связанный с нормальным законом – метод параллелепипедов, называемый иногда методом прямоугольников. Он использует сведения о классах в виде векторов средних значений яркости и векторов дисперсий, полученные в процессе обучения. Известно, что для нормально распределенной случайной величины 95,4 % её значений лежат в пределах отклонений от среднего значения, меньших [51].

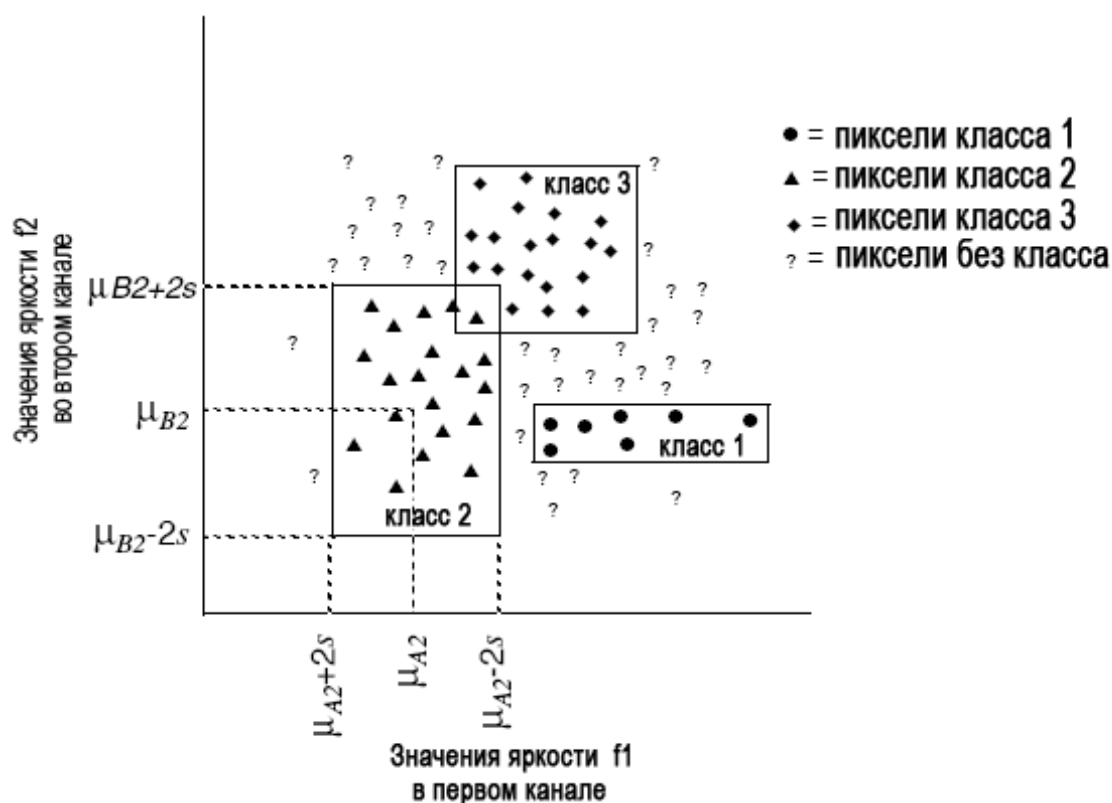


Рисунок 2 – Классификация по методу параллелепипеда использующая два стандартных отклонения как пределы

Метод параллелепипедов относится к числу быстрых методов классификации, однако, по качеству распознавания они уступают большинству из рассмотренных методов. Метод параллелепипедов целесообразнее всего использовать для предварительной классификации. Он наиболее эффективен при нормальном законе, так как для него выполняется упомянутое выше "правило двух сигма" [52].

В пакете ERDAS могут быть использованы следующие пределы:

- Минимальное и максимальное данные в файле для каждого вида сигнатуры
- Любые пределы, которые вы захотите, основанные на знаниях данных и сигнатур.

Правило пространства признака определяет, находится ли классифицируемый пиксель в пределах непараметрической сигнатуры в пространстве признака изображения или нет. Когда это подтверждается, пиксель присоеди-

няется к соответствующему классу. На рисунке изображен двумерный пример классификации методом пространство признака.

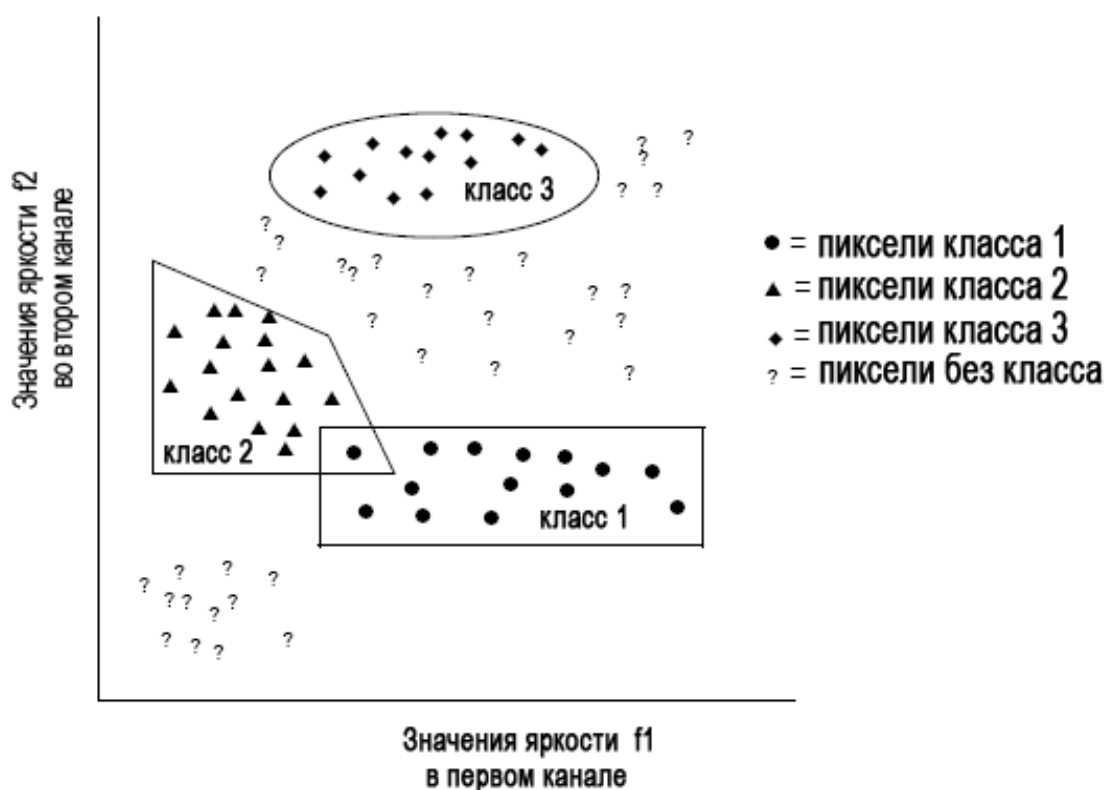


Рисунок 3 – Классификация по пространству признака

Сравнивая с методом параллелепипеда можно отметить улучшение точности классификации при малой потере скорости операции. Среди недостатков метода следует указать сложность интерпретации классифицированного изображения и наличие зон перекрытия и неклассифицированных пикселей на обработанном изображении.

В работе с пакетом ERDAS, в случаях, когда пиксель попадает в зону перекрытия нескольких участков, классификация может проходить следующими способами:

- Пиксели могут быть классифицированы по номеру сигнатуры в списке. Если, например, одна сигнатура в списке первая, а другая четвертая, то пиксель будет отнесен к классу первой сигнатуры. Эта очередность может быть настроена в Signature Editor.

- Пиксели могут классифицироваться по установленным параметрам. Пиксель тестируется только на зоне перекрытия сигнатур по определенным параметрам. Если ни одна из сигнатур не подходит под эти параметры, то пиксель удаляется из обоих классов. Если только одна из сигнатур подходит по параметрам, то пиксель автоматически присоединяется к данному классу.

- Пиксель может просто не классифицироваться.

Зона вне границы.

Аналогично если пиксель не попал ни в один параллелепипед, то он может быть классифицирован следующими способами.

- Пиксель может классифицироваться по установленным параметрам. Пиксель тестируется заново по определенным параметрам для всех сигнатур. Если ни одна из сигнатур не подходит под эти параметры, то пиксель не классифицируется.

- Пиксель может просто не классифицироваться.

1.4 Средства ГИС для анализа, вычислений и картографии

Геоинформационная система (географическая информационная система, ГИС) – система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информации о необходимых объектах.

Основная идея ГИС – связь данных на карте и в базе данных. ГИС – это и аналитические средства для работы с любой координатно-привязанной информацией. ГИС можно рассматривать как некое расширение концепции баз данных. В этом смысле ГИС фактически представляет собой новый уровень и способ интеграции и структурирования информации.

С помощью ГИС решается ряд задач в картографии: преодолеваются основные недостатки обычных карт – их статичность и ограниченная емкость как носителя информации. В последние десятилетия бумажные карты из-за перегруженности информацией становятся нечитабельными. ГИС же обеспе-

чивает управление визуализацией информации. Появляется возможность выводить (на экран, на твердую копию) только те объекты или их множества, которые интересуют нас в данный момент. Фактически осуществляется переход от сложных комплексных карт к серии взаимоувязанных частных карт.

Между векторными и растровыми изображениями имеется различие, характерное для ГИС. Растровые изображения отображают поля данных, т.е. носят полевой характер. Векторные изображения в ГИС, как правило, отображают геоинформационные объекты, т.е. носят объектный характер. Важной характеристикой векторных данных является приведенный масштаб - то есть масштаб детальности, которому соответствуют векторные объекты. Однако эта характеристика не является универсальной и относится скорее к векторным топографическим данным, создаваемым по бумажной картографической продукции определенного масштаба. Так как в одном слое могут находиться объекты, созданные с разной детализацией, то часто говорить о масштабе векторных данных – не корректно. В таблице 2 приведена сравнительная характеристика векторных и растровых изображений.

Таблица 3 – Сравнение растровой и векторной модели данных.

Свойство/Модель данных	Растровая	Векторная
Масштабируемость	—	+
Избыточность (объем данных)	—	+
Передача непрерывных свойств	+	—
Передача дискретных объектов	—	+
Легкость создания	+	—

В общем случае ввод информации для задач ГИС осуществляется комплексно: по данным дистанционного зондирования, со снимков спутников, аэроснимков, по материалам дешифрирования снимков, полевым измерениям, по информации с карт.

Далеко не все ГИС снабжены возможностями специализированного анализа, например геологического. Связано это с тем, что четкой схемы про-

ведения таких работ, не существует и организации, занимающиеся ими, предпочитают производить анализ по собственным методикам и правилам. Работа со специфическими данными специфическим образом является характерной чертой этого типа анализа. Кроме того, взгляды на приемы его проведения могут меняться с течением времени. Поэтому такие возможности в ГИС представляются средствами создания приложений самими пользователями. Сложность состоит в том, для каждой специализированной области возникает необходимость создавать отдельное приложение к ГИС и часто даже свою методику обработки. Это не всегда возможно и часто дорого.

Методы классификации используются в решении следующих основных задач:

- классификация процессов и явлений;
- районирование, типология;
- выявление определяющих факторов;
- пространственно-временной анализ;
- интерполяция и создание моделей поверхности
- анализ и прогнозное картирование пространственно-распределенных данных и т.д. [54; 55; 56; 57].

2 Методика работы

Работа состояла из двух этапов: наземных исследований и камеральной обработки дистанционных данных (космических снимков) с представлением и анализом полученных результатов.

На первом этапе подбирались репрезентативные участки полигона исследования (Танзыбейского участкового лесничества), они были натурно обследованы в ходе летней полевой практики, в период с 17 по 30 июля 2017 г. в Ермаковском районе (полигон-трансект стационара ИЛ СО РАН «Ермаковский»), северный макросклон Кулумысского хребта. Полевые работы включали в себя: фиксирование координат пробных площадей средствами наземного позиционирования GPS, представленных в районе стационара «Ермаковский»; оценку качественных признаков, используемых при дешифрировании космоснимков. Для дешифрирования состава насаждений на локальном уровне нами были исследованы пять опытных участков, представленных на рисунке 2. Для них была поставлена задача идентифицировать пробные площади с господством кедра 9-10 ед. состава на фоне смешанных хвойно-лиственных участков, которые служили контролем.

Реализован натурный метод исследования пространственной структуры растительного покрова, который заключался в крупномасштабном картографировании древостоя, травяного покрова и топографии. Для выявления прямых и косвенных диагностических признаков территориальных подразделений растительности была осуществлена процедура дешифрирования космических снимков Landsat-8 с разрешением 30, космоснимков Terra MODIS, Sentinel-2 на основе методов прикладного пакета Erdas.

Кроме того, для всей территории Танзыбейского лесничества стояла задача подобрать репрезентативные участки ландшафтов и провести их наземное обследование для дальнейшего сравнения с материалами космосъемки. А также изучить ландшафтно-экологические особенности типов леса в пределах различных высотных ландшафтных поясов характерных для северного макро-

склона Западного Саяна. На основании собранной информации составлена база данных, включающая в себя материалы наземного лесоустройства для дальнейшего сравнения с данными дистанционного исследования.

После этого были подобраны наиболее информативные космоснимки с представленных спутников. Данные находятся в открытом доступе, возможны для просмотра и использования [58; 59; 60]. После подбора подходящих снимков происходит процесс дешифрирования и классификации изображения в программном комплексе Erdas Imagine.

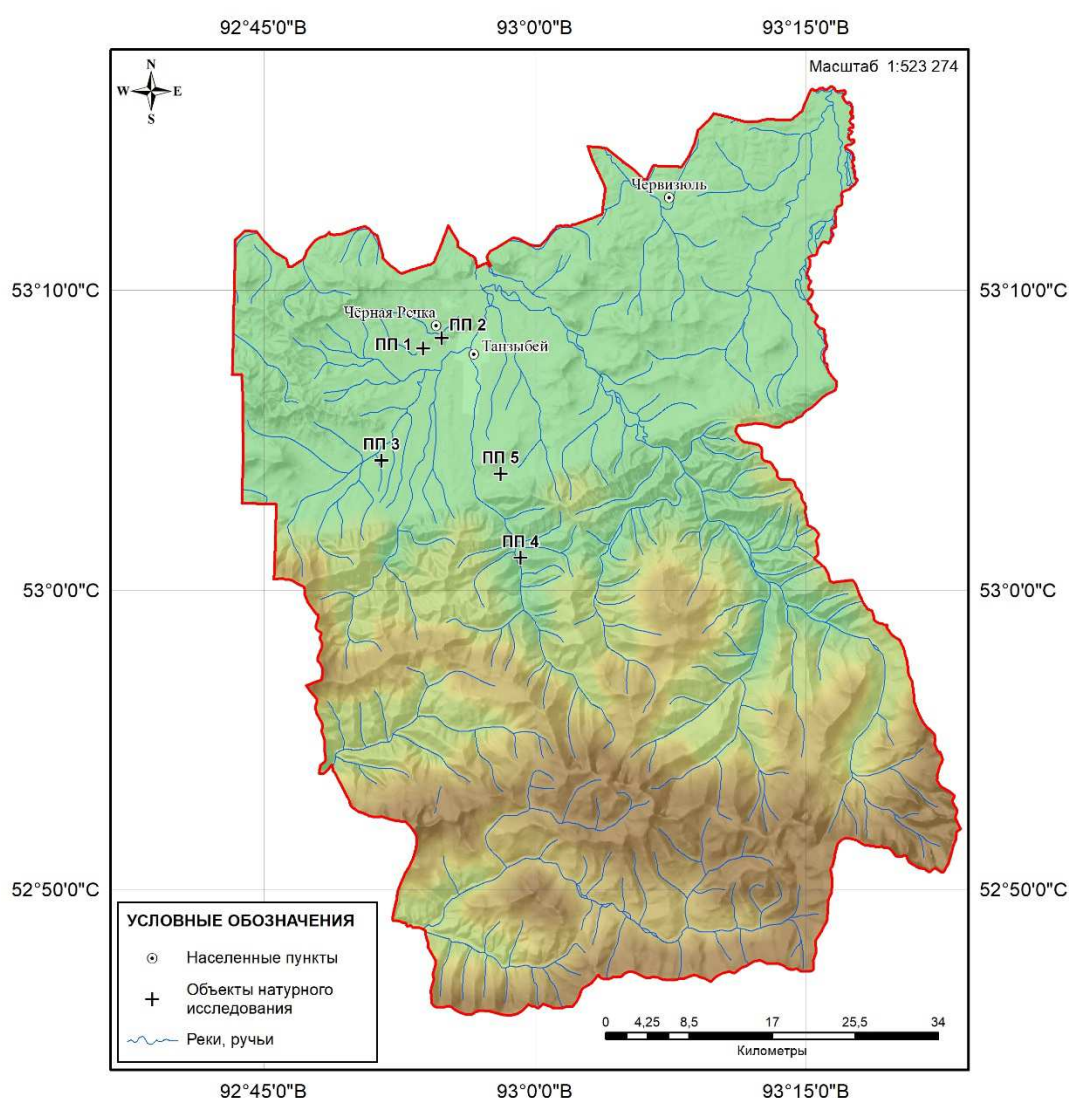


Рисунок 4 – Опытные участки на территории Танзыбейского участкового лесничества

Объективное дешифрирование космической информации позволяет регулярно анализировать и изучать состояние природной среды, а также динамику природных явлений.

В настоящее время наряду с визуальным дешифрированием космических изображений все чаще используются компьютерные методы. Так, в программном продукте по обработке изображений Erdas Imagine 8.3 заложены два алгоритма компьютерной классификации – автономная, или неконтролируемая (Unsupervised Classification) и классификация с обучением (Supervised Classification) [61].

Классификация – это процесс сортировки (распределения по классам) элементов изображения (пикселей) на конечное число классов обычно по параметрам, информации, которые несет в себе изображение, т.е. на основе различий в значениях спектральной яркости (рисунок 3). Если пиксел удовлетворяет некому условию классификации, он относится к определенному классу, который соответствует этому условию.

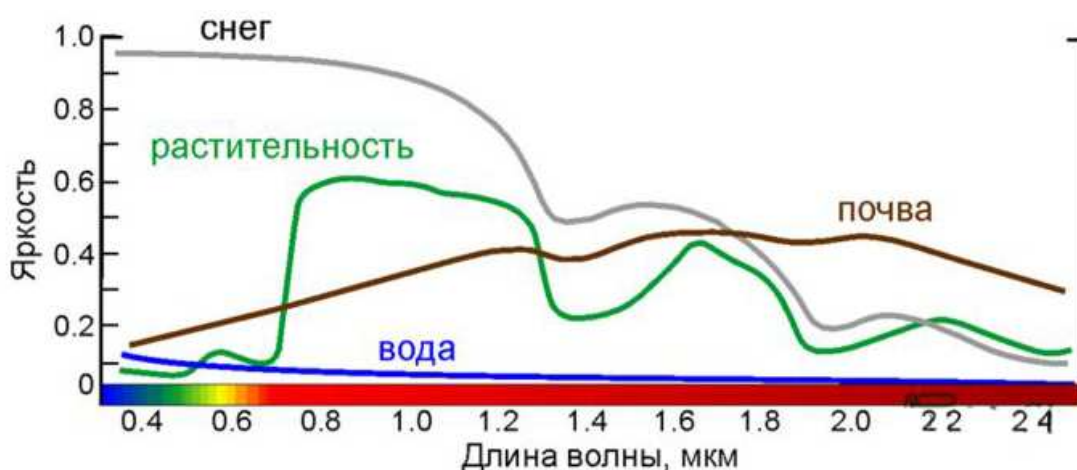


Рисунок 5 – Спектральные параметры природных объектов

Основополагающим в классификации является правильный выбор признаков. Для успеха классификации в пространстве спектральных признаков каждому классу должны соответствовать своя область значений яркости, не пересекающаяся с областями других классов. Чтобы проверить, так ли это,

строят двумерные графики пространства спектральных признаков и выбирают для классификации те сочетания спектральных зон, в которых изучаемые объекты различаются лучше всего [62].

По характеру реализации выделяют способы компьютерной классификации с обучением (контролируемой) и без обучения (неконтролируемой). В способах классификации с обучением используются заранее определенные человеком эталонные значения спектральной яркости объектов. В интерактивном задании этих значений и состоит обучение. В процессе классификации значения яркости текущего пиксела сравниваются с эталонными, и пиксел относится в наиболее подходящий класс объектов. Качество обучения можно оценить по правильности классификации эталонных участков.

В способах классификации без обучения (кластеризации) вначале проводится автоматическое разделение пикселей на группы. Исходная информация, задаваемая дешифровщиком, количество классов, которые необходимо получить. На первом этапе изображение разделяется на массивы сходных по спектральным характеристикам пикселей – кластеры. Затем дешифровщик анализирует характеристики кластеров, сопоставляет их с характеристиками реальных географических объектов и определяет, к каким объектам относится кластер.

Полученные результаты классификации более объективно отражает близкие по значениям дешифровочных признаков группы объектов. Однако, одни и те же объекты могут попасть в разные кластеры, например, из-за условий освещения, а разные объекты оказаться в одном кластере из-за близкой спектральной яркости (лесная растительность и гидрография).

В ходе исследования использовалась неконтролируемая классификация с выделением 10 характерных классов, на основании спектральных особенностей ландшафтов и растительного покрова. Ввиду описанных особенностей данной методики дешифрирования после процедуры классификации необходимо устранить ошибки, допущенные программным обеспечением.

После получения удовлетворительного результата на предыдущем этапе была проведена математическая и статистическая обработка данных: извлечены значения площади классов, рассчитана их площадь, Полученная информация интерпретирована и представлена в графическом виде.

3 Результаты наземных исследований

В ходе наземных работ были проведены ландшафтно-экологические исследования фитоценозов, преимущественно кедровников и производных от них сообществ.

На исследуемых пробных площадях отмечались особенности растительного покрова, отмечалась геоморфологическая приуроченность растительного сообщества (абсолютная высота, экспозиция, крутизна склона), особенности мезо- и микрорельефа. Одновременно были зафиксированы географические координаты фитоценозов для дистанционного дешифрирования и их привязки на местности. В процессе изучения и описания объектов исследования были использованы результаты исследований других авторов. Всего было рассмотрено пять опытных участков.

Ниже приведена краткая характеристика объектов наземного обследования пробных площадей.

18 июля 2017 года, при $t=20^{\circ}\text{C}$, в 500 метрах к юго-западу от Стационара «Ермаковский» был исследован участок растительного покрова в двух точках. Координаты $53^{\circ} 8'1.76''\text{C}$ $92^{\circ}53'52.87''\text{В}$. Высота над уровнем моря составила 310 м.

Место исследования располагается в понижении Танзыбейской котловины. Микрорельеф представлен слабозаметной гривкой, окруженной таволгово-щучковым лугом в понижениях. На участке гривки обильный подлесок из черемухи, малины, дерена, смородины красной. В куртинах леса обилие видов не стабильно. В подлеске доминируют шиповник, боярышник, дерен. В древостое береза и сосна, которая встречается редко, сомкнутость составляет 0,2 [63].

Микрорельеф второй точки аналогичен первой. В древостое второй точки смесь всех пород, примерно такой состав: 5С 2Пх 2 К, 2 Б + Ос, куртины кедра рядом с сосной и березой, возраст около 60-90 лет, Пихта тоже разновозрастная, постоянно добавляется в древостой из подроста. С – возраст более

100 лет, нет ее подроста, травяной покров высотой 40-60 см. Общая сомкнутость 0,5. Вокруг грядки – молодой (до 20 лет) березняк крупнотравно-щучковый с тавологой.



Рисунок 6 – Растительное сообщество первого объекта исследования: сосняк с кедром, пихтой и березой коротконожково-крупнотравный с неморальными видами на месте коренного кедровника черногого крупнотравно-папоротникового

20 июля 2017 года, при $t=16^{\circ}\text{C}$, был исследован опытный участок Китаева гора. Координаты $53^{\circ}2'41.4''\text{C}$, $92^{\circ}54'51.1''\text{В}$. Высота над уровнем моря – 450 м.

Объект находится на высоте 430 м. на северном склоне Китаевой горы в приводораздельной части склона крутизной 7-8 градусов. Гора сложена мощной толщей покровных лессовидных суглинков, на южном склоне имеются выходы интрузии гранитных пород, благодаря которым склон южной экспозиции крутой и покрыт сосновым лесом с разнотравным покровом. Остальная территория Китаевой горы представляет собой смешанные хвойно-лиственные леса, производные от сосняков, характерных для подтаежного пояса, с обильным возобновлением темнохвойных пород – пихты и кедра.

В 1966г. здесь были проведены рубки ухода за кедровым подростом в смешанных 30летних молодняках в секции С-I и С-II, с целью ускорить формирование кедровников из подроста. Одновременно сохранены контрольные участки, где рубки не проводились. В итоге проведено сравнение эксперимента и контроля. На 2010 г. на пробной площади С-II сформирован Кедровник крупнотравно-папоротниковый с широколиственным и разнотравьем, который характеризуется наибольшим запасом (290 м³/га) и наибольшим значением среднего диаметра (37,4 см при среднем возрасте кедров 80-85 лет) среди всех насаждений ключевого участка «Китаева гора». Это свидетельствует об эффективности рубок ухода при формировании высокопродуктивных кедровников.



Рисунок 7 – Контрольный участок А-I натурального исследования на Китаевой горе. Осиново-пихтовый лес осочково-широколиственный с примесью кедра

На контрольных участках (А-I и А-III) наблюдается естественный ход сукцессии. За 18 лет (к 1984 г.) под пологом осинником папоротниково-

широкотравного с примесью кедра (А-I) произошло накопление молодых пихт, сформировавших выраженный второй ярус. В последующие 20 лет часть пихт выходит в первый ярус, вследствие чего к 2005 г. доля пихты в его составе достигает 7 единиц по запасу. За 47 лет мониторинга (с 1966 г.) значение средней высоты древостоя выросло в 2,2 раза, среднего диаметра – в 2 раза, запаса древостоя – в 3,2.

В отличие от А-I, на А-III сомкнутость древостоя остается заметно ниже (0,4). Разреженный полог способствовал развитию на пробной площади крупнотравья и папоротников, которые служат серьезным препятствием для возобновления кедра. Поэтому пополнения первого яруса древостоя молодыми кедром за прошедшие 50 лет не произошло. Естественный отпад обусловил снижение численности деревьев в 7 раз (с 1966 по 2010 г.), преимущественно за счет лиственных пород. Доля осины в запасе сократилась с 7 до 2 единиц. Оформилась редина смешанного состава (5K2Oc3B1C) на месте прежнего осинника с кедром. Наблюдается увеличение среднего диаметра кедра в 2,4 раза (за счет медленного, но стабильного прироста кедров), средней высоты – в 1,8 раз., распределение кедров групповое, в центре пробы А-III большое окно.

Для экспериментальных участков С-I и С-II характерна высокая жизненность древесного яруса, образованного кедром, и низкая жизненность подлеска, тяготеющего к окнам древесного полога: черемухи (*Padus avium*), ивы козьей (*Salix caprea*), рябины (*Sorbus sibirica*), калины (*Viburnum opulus*), смородины красной (*Ribes hispidulum*), малины (*Rubus idaeus*) и спиреи дубровколистной (*Spiraea chamaedryfolia*). Развитие кустарников достаточно слабое, а их размещение – локально.

Наблюдаемое на ПП А-III в последние годы выпадение деревьев обуславливает существенные изменения в соотношении и пространственном распределении подлеска. По сравнению с прошлыми этапами инвентаризации заметно меньше стало ивы, возросло участие черемухи. Калина и рябина по-прежнему немногочисленны.

22 июля 2017 года, при $t=16^{\circ}\text{C}$, был исследован участок «Лежневка» Координаты $53^{\circ}2'41.4''\text{C}$, $92^{\circ}54'51.1''\text{B}$. Высота над уровнем моря – 450 м.

Это участок пихтово-лиственного насаждения на месте кедровника низкогогорного крупнотравно-папоротникового. Рельеф представляет собой пологий шлейф Кулумысского хребта, абсолютной высоты 450-480 метров, северная экспозиция, крутизна 5-7 градусов. Поверхность волнистая. Почвы – дерново-подзолистые, тяжелосуглинистые влажные и сырые на делювиальных отложениях с выходами хлоритовых сланцев на глубине более 50 сантиметров [64].

Тип леса для данного участка – пихтарник с осиной и кедром крупнотравно-папоротниковый низкогогорный. Древостой двухъярусный с господством пихты и осины, с примесью кедра и березы. Подлесок редкий, встречаются: смородина красная, спирея, бузина, рябина и др.

Травяной покров включает страусник, щитовник игольчатый, кочедыжник женский, виды крупнотравья (борец, осот разнолистный, скерда сибирская, и др.), широколистное (брунера, подмаренник душистый, вика лесная, и др.), таежного мелкотравья (кислица, майник, линнея). Обильны виды лесного разнотравья: медуница, подмаренник северный, лютик слабоакаймленный, фиалка, звездчатка Бунге.

Общее проективное покрытие 80-90% выделяются две господствующие синузии: крупнотравно-страусниковая и вейниково-папоротниковая.



Рисунок 8 – Участок натурного исследования на территории Лежневки

Травяной покров на всех пробных площадях представлен крупнотравьем (*Aconitum septentrionale*, *Crepis sibirica*, *Lathyrus gmelini* и др.) и папоротниками (*Athyrium monomachii*, *Dryopteris expansa*, *Dryopteris filix-mas* и *Matteuccia struthiopteris*) с разной долей участия широколиственного (Anemone baicalensis, Brunnera sibirica и др.) и вейников (*Calamagrostis obtusata* и *C. langsдорffii*). Нижний подъярус образуют весенние эфемероиды и кислица (*Oxalis acetosella*). Моховый покров развит слабо.

Пространственное распространение видов определяет выделение в рамках пробных площадей двух господствующих растительных группировок – синузий травяного покрова: крупнотравно-папоротниковой и вейниково-щитовниковой. Приуроченность синузий обусловлена, прежде всего, сомкнутостью древостоя, определяющей режим освещения. Так, крупнотравно-папоротниковый покров характерен для окон и прогалин, а вейниково-щитовниковый - приурочен к сомкнутым участкам.

Низкая численность кедрового подроста – от 200 до 700 экз./га – обусловлена преобладанием крупнотравья и папоротников в травяном покрове. Их механическое влияние и аллелопатическое действие определяют приуроченность кедрового подроста к валежу, приствольным кругам крупных деревьев, участкам с разреженным травяным покровом. Сравнение полученных результатов с другими данными учета позволяет выявить современные закономерности роста кедрового подроста. На данный момент присутствие кедра на территории Лежневки носит неустойчивый характер, в ходе естественной динамики пихта надолго удерживает свое господство на месте бывшего кедровника.

23 июля 2017 года, при $t=19^{\circ}\text{C}$, было исследовано растительное сообщество третьей пробной площади. Координаты $53^{\circ}1'4.10''\text{C}$, $92^{\circ}59'12.10''\text{B}$. Высота над уровнем моря – 550 м. Тип леса - Кедровник осочково-крупнотравно-папоротниковый среднегорный черневой.

Рельеф ПП №3 представляет среднегорный склон эрозионно-денудационный рельеф Кулумысского хребта, нижняя и средняя часть склона западной экспозиции к реке Малый Кебеж, крутизна около. 20 град. Абсолютная высота 550 метров. Почва представлена горно-таежным буроземом, мало-мощным тяжело суглинистым на каменисто-щебнистом элюво-делювии хлоритовых сланцев, местами выходящих на дневную поверхность.

В 1965 г. древостой на ПП №3 (кедровник осочково-крупнотравно-папоротниковый) был представлен 2мя ярусами: 1ый ярус – $6K_{(193)}3K_{(282)}1P_{(136)}+K_{(370)}ед.Б_{(101)}$, со средней высотой 27,5 м., полнотой 0,71, густотой кедра и пихты. 2ой ярус – $8P_{(87)}1K_{(110)}1P_{(43)}$, со средней высотой 13,9 м, запасом $27\text{ м}^3/\text{га}$, полнотой 0,13, густотой 13 экз./га кедра и 269 экз./га пихты. Индекс перекрытия крон был равен 1,5. Площадь крон была равна 118 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$.

Подлесок на пробной площади имеет 2 подъяруса. Первый подъярус разреженный, развит куртинами, преимущественно в окнах, представлен, главным образом, черемухой. Второй подъярус более сомкнут, хотя и нерав-

номерен. В нем господствует спирея дубровколистная. Общее проективное покрытие подлеска приблизительно равно 0,3. Высота первого подъяруса 4 м, второго - 1,2 м.



Рисунок 9 – Кедровник осочково-крупнотравно-папоротниковый западной экспозиции

Более равномерно и обильно протекает процесс возобновления пихты, формирующей мелкие группы разновозрастного подроста, из которых в дальнейшем может пополняться второй ярус древостоя. В синузиях с преобладанием осики большехвостой и кислицы обыкновенной пихтовый подрост представлен в количестве 2-2,5 тыс. экз./га, в крупнотравно-папоротниковой и борцово-щитовниковой синузиях – 350-1500 экз./га.

Таким образом, ход лесообразовательного процесса в черневом кедровнике ведет к укреплению позиций пихты, которая повсеместно формирует второй ярус и выходит в первый ярус древостоя. Смешанный состав древостоя из кедра и пихты является наиболее устойчивым состоянием черневых кедровников. Кедр сохраняет свое господство благодаря большей долговечности,

по сравнению с пихтой: средний возраст кедрa 220-240 лет, а максимальный более 500 лет, тогда как пихта усыхает уже в возрасте от 80 до 120 лет, редко доживая до 180 лет. Поэтому преобладающий состав кедровников в черневом поясе от 4К6П до 7К3П, редко 8К2П и еще реже 10К+П. Это следует иметь в виду, дешифрируя состав кедровников в черневом поясе.

24 июля 2017 года, при $t=19^{\circ}\text{C}$, был исследован участок коренного кедровника на пробной площади 5. Координаты $53^{\circ}2'56''\text{C}$, $92^{\circ}55'14''\text{В}$. Высота над уровнем моря – 450 м.

Постоянная пробная площадь №5 заложена в кедровнике низкогорно-черневом крупнотравно-папоротниковом и может служить контролем к опытному участку Лежневка, где была вырубка главного пользования в аналогичном типе леса в 1948 году.

Рельеф пятой пробной площади представлен как нижняя пологая часть склона Кулымысского хребта в бассейне р. мутной. Абсолютная высота ок. 450 м., поверхность волнистая, склон северной экспозиции, сложен лессовидными суглинками на элюво-делювии хлоритовых сланцев. Почвы дерново-подзолистые, тяжелосуглинистые, влажные и сырые.

Представленный на ПП № 5 кедровник низкогорный крупнотравно-папоротниковый является коренным типом леса, аналогичным кедровнику, замещенному производными насаждениями на пробных площадях объекта «Лежневка».

К 2017 г. на ПП № 5 сохранилось господство крупнотравно-папоротниковой синузии. На обследованной площадке было обнаружено лишь 2 экземпляра мелкого кедрового подроста, приуроченные к рыхлопокровной прикорневой зоне крупного кедрa. На остальной территории мощно развитый травяной покров обуславливает отсутствие возобновления кедрa.



Рисунок 10 – Травяной покров на пробной площади 5, кедровник низкогорный крупнотравно-папоротниковый

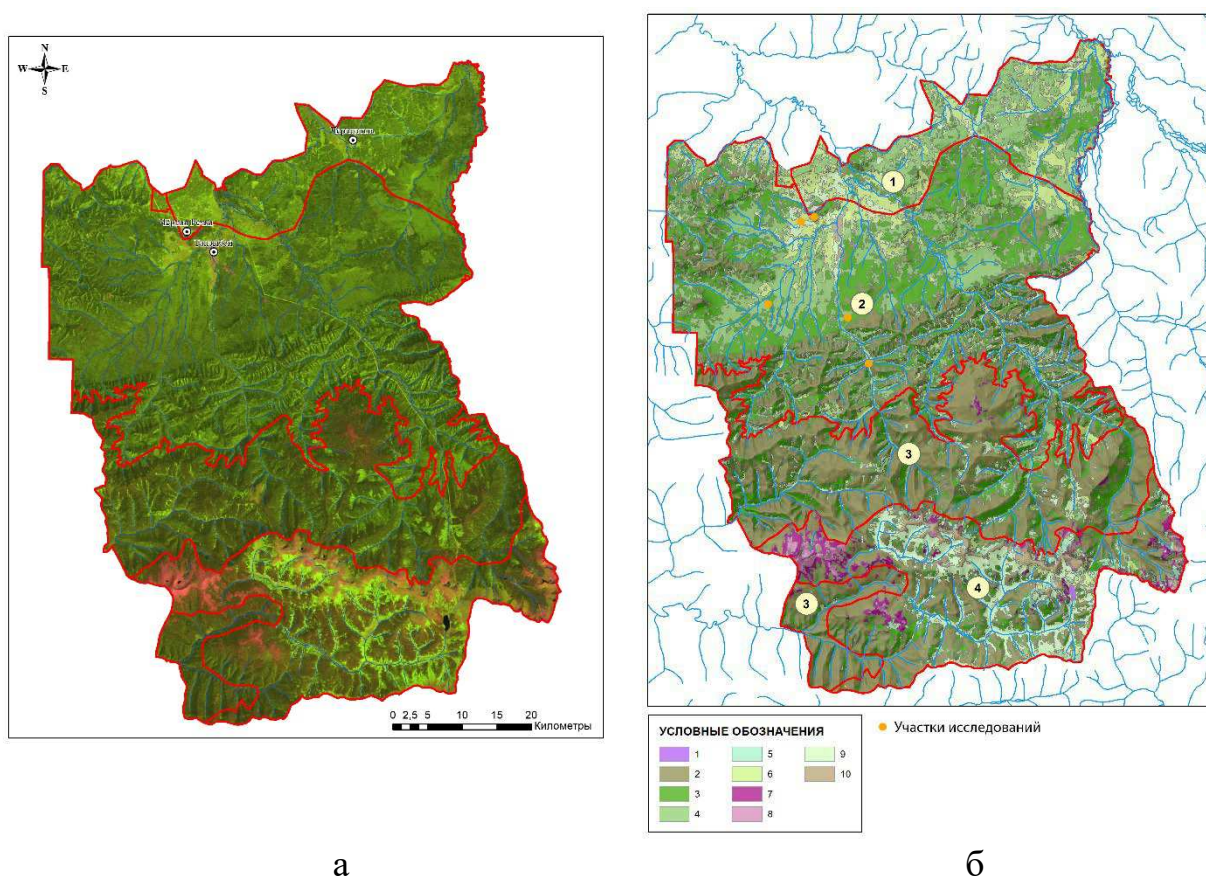
Присутствие на объекте экземпляров пихтового подроста всех категорий крупности подтверждает его жизнестойкость и жизнеспособность в условиях крупнотравно-папоротниковой серии типов леса.

Возобновление кедра в обследованных коренных низкогорных кедровниках крупнотравно-папоротниковой серии типов леса оценивается как неудовлетворительное. Данная тенденция является характерной особенностью черневых лесов Северной Алтайско-Саянской провинции и говорит о возможной смене кедровников пихтово-лиственными насаждениями в ходе естественной динамики после рубок главного пользования.

Установлено, что для разграничения видового состава древостоя на уровне доминирующей породы кедра спутниковыми изображениями Landsat, Sentinel-2, Modis оказались недостаточно информативными ввиду разрешающей способности изображения в 250 м [65].

4 Результаты дистанционных исследований

На основе данных высот масштаба 1: 1 000 000 из открытых источников получена цифровая модель рельефа, которая была использована для исследования ландшафтных характеристик (рисунок 4). С помощью методов ДЗЗ проведена классификация исследуемого участка с выделением ландшафтных категорий. На основании данных классификации экспертным методом с учетом данных наземного лесоустройства были выделены ряд природных зон, которые проявляются в виде высотной зональности характерной для данного региона [66; 67; 68].

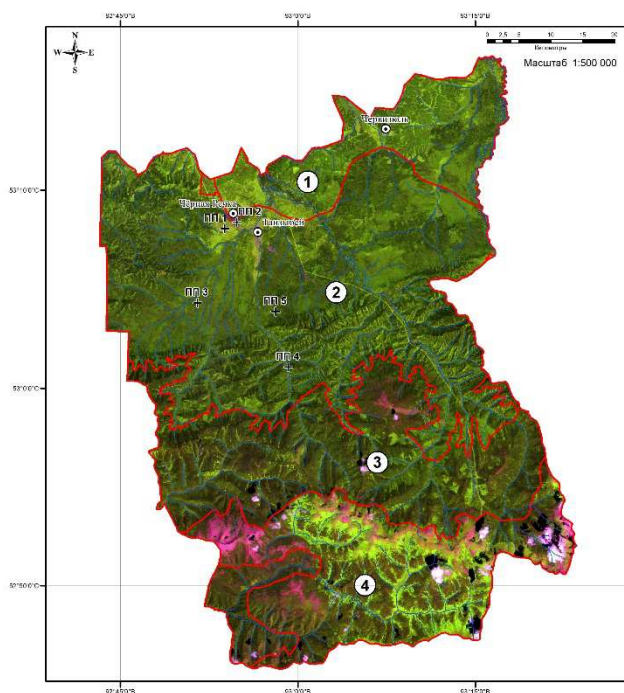


1 – безлесные голыцы, каменистые и скалистые участки; 2 - темнохвойные леса (кедр, пихта, смесь темнохвойных пород); 3 - предгорные вторичные леса и кустарники на пологих склонах и террасах; 4 - предгорные леса в Танзыбейской котловине и бассейне р. Червизюль; 5 - производные луга, кустарники, молодняки березово-пихтово-осиновые травяные; 6,9 - Субальпийские луга и кустарники; 7, 8 – горные тундры, скалы, осыпи; 10 – гребни хребтов.

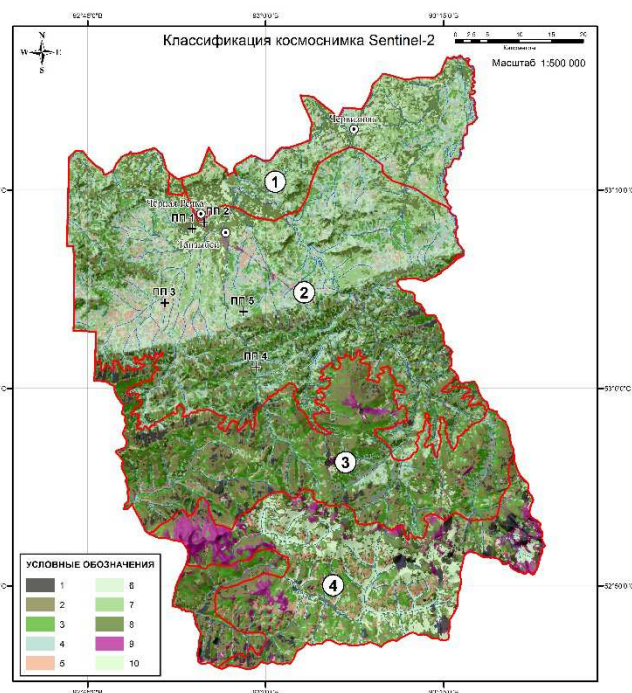
Рисунок 11 – Классификация полигона исследования по материалам спутника Landsat-8; а – космоснимок, б – результат классификации;

Для каждого из классов подсчитана площадь покрытия. Из полученных данных видно, что преобладающий класс – темныхвойные леса (кедр, пихта, смесь темныхвойных пород) преимущественно теневых экспозиций. Зеленомошная и травяно-зеленомошная группы типов (15,8 %) и предгорные вторичные леса и кустарники на пологих склонах и террасах. Хвойно-лиственные молодняки (с березой, осиной). Следует отметить, что в высокогорьях – класс, выделенный как программная погрешность при дешифрировании снимка, связанный с тенью от склона, падающей на нижнюю часть склонов восточной экспозиции. Учитывая физико-географические особенности данной территории не удивительно, что так же не малый процент проективного покрытия приходится горные тундры, скалы, осыпи (14,2 %).

Аналогичная работа была проведена с материалами космосъемки со спутника Sentinel-2.



а

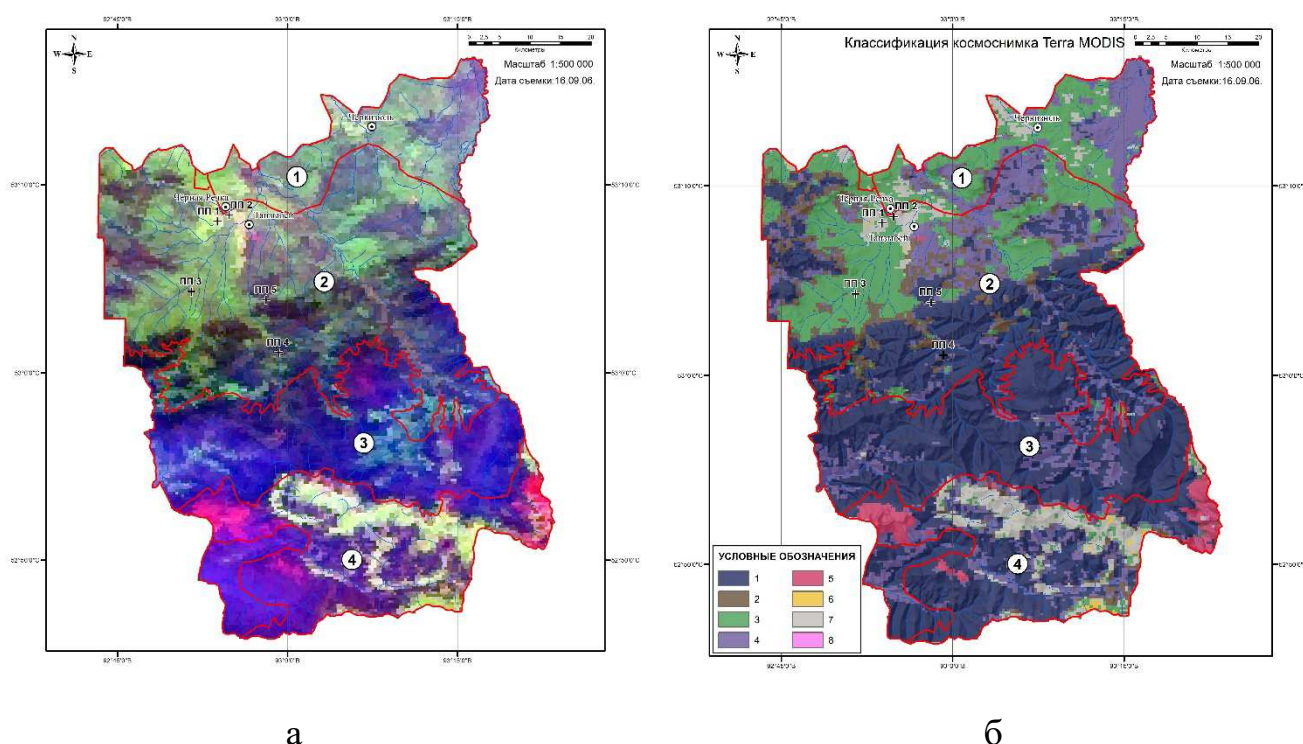


б

1 – облачность, 2 – темнохвойная тайга теневых склонов с преобладанием пихты, 3 – горнотаежные темнохвойные леса на склонах восточных и юго-восточных экспозиций в сочетании с луговыми сообществами (крупнотравными еланями), 4,5 – пихтово-лиственные производные леса и кустарники на почвах с избыточным увлажнением (крупнотравные папоротниковые, вейниковые) в низкогорьях и предгорной котловине черневого пояса (черневой ВПК) в сочетании с заболоченными кустарниками; 5 – субальпийские пихтово-кедровые травяно-зеленомошные бадановые, мелкотравно-зеленомошные массивы; 6,7,10 – субальпийские луга и редколесья, 8 – травяно-болотные темнохвойные леса с пихтой, елью и кедром; 9 – голыцы, каменистые и скалистые участки

Рисунок 12 – Классификация растительного покрова по материалам спутника Sentinel-2, а – космоснимок, б – результат классификации.

Для данного снимка была проведена неконтролируемая классификация. Дата съемки 04.08.2017. В отличие от Landsat, Sentinel имеет часть каналов с разрешением 10 м. и часть – 20 м и 3 канала – 60 м.



1 – темнохвойная среднегорная тайга (пихта, кедр); 2- долины рек на склонах северной экспозиций; 3 –предгорные смешанные леса избыточной увлажненности (береза, пихта, осина, ива), болота; 4 – мелколиственные (береза, осина) и смешанные (пихта, сосна) леса; 5 - скалистые участки; с ; 6 – лесостепь; 7 – безлесные участки антропогенного происхождения (сенокосы и др.), субальпийские луга; 8 – облачность

Рисунок 13 – Классификация полигона исследования по материалам спутника MODIS, а – космоснимок, б – результат классификации;

Если использовать комбинацию каналов, при дешифрировании, которая считается лучшей для работы с лесными сообществами, то разрешение снимка – 20 м. что в итоге не сильно отличается от Landsat. Однако, можно получить снимок Sentinel-2 с разрешением 10 м. на основе каналов RGB, который смотрится значительно точнее.

Изначально производилось дешифрирование Landsat при комбинации каналов для лесов. Получились значительные отличия от классификации по снимку Landsat, вызванные параметрами отображения (свет, контраст и др.) т.к. параметры классификации для обоих снимков были заданы одинаковые.

Анализируя и сравнивая результаты работы методами дистанционного зондирования с данными полученными в ходе полевых работ, можно сделать вывод что корреляция между данными со спутника Landsat более объективны, прослеживается четкая корреляция с данными летней практики в районе стационара «Ермаковский».

Ввиду технических особенностей спутника Terra MODIS: его пространственного разрешения, которое равно 250 м в отличие от 30 м Landsat и 10 м. Sentinel, периода обращения, и др. (глава 1), полученные результаты исследования по данным спутника Modis значительно отличаются от предыдущих. Не настолько четко прослеживается граница природных зон и ландшафтов, уникальные признаки растительности детектируются сложнее и с большей долей

погрешности. Тематическая карта, полученная в ходе классификации приведена на рисунке 4.

Таблица 4 - Статистические данные полученные по материалам классификации спутника Landsat – 8, Sentinel-2

Номер класса	Площадь (тыс. га)	Процентное соотношение (%)	Площадь (тыс. га)	Процентное соотношение (%)
	Landsat - 8		Sentinel-2	
Гольцы	4,50	2,91	6,02	3,89
Темнохвойные леса	23,10	14,94	23,63	15,28
Предгорные леса на пологих склонах	24,70	15,97	25,23	16,31
Предгорные леса Танзыйской котло- вины	18,22	11,78	17,76	11,48
Луга, долины рек	13,22	8,55	9,47	6,12
Субальпийские луга	12,84	8,30	14,35	9,28
Горная тундра	19,87	12,85	21,38	13,83
Избыточно обвод- ненные леса, болота	19,90	12,87	21,41	13,84
Кустарники, подрост	9,41	6,09	6,32	4,08
Гребни хребтов	8,90	5,75	9,09	5,88
Итого	154,65	100,00	154,65	100,00

В процессе работы с космоснимками Terra MODIS были использованы комбинации каналов 1 (0,67-0,62 мкм), 2 (0,876-0,841 мкм), 31 (11,280-10,780 мкм). Канал 31 несет информацию о температурных значениях подстилающей поверхности. Данная особенность проявила себя при дешифрировании и классификации изображения: безлесные участки и субальпийские луга были объединены в один класс. Т.е. высотная поясность с данного спутника прослеживается более отчетливо в сравнении с другими исследуемыми.

Из результатов, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что по данным спутника преобладающими типами растительности являются темнохвойные и производные леса, а также смешанная подтайга, которая в большей степени представлена хвойными и лиственными породами. Следует добавить,

что технические возможности спутника Terra MODIS не приспособлены для мониторинга объектов локального и регионального уровня, масштаб и пространственное разрешение наиболее подходит для изучения объектов глобального уровня.

В данной работе оценивается возможность применения вегетационных индексов для оценки динамики активности фотосинтезирующих растений. Вегетационные индексы - показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных космической съемки, и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Для того чтобы оценить сезонную динамику Вегетирующей растительности был выбран индекс NDVI.

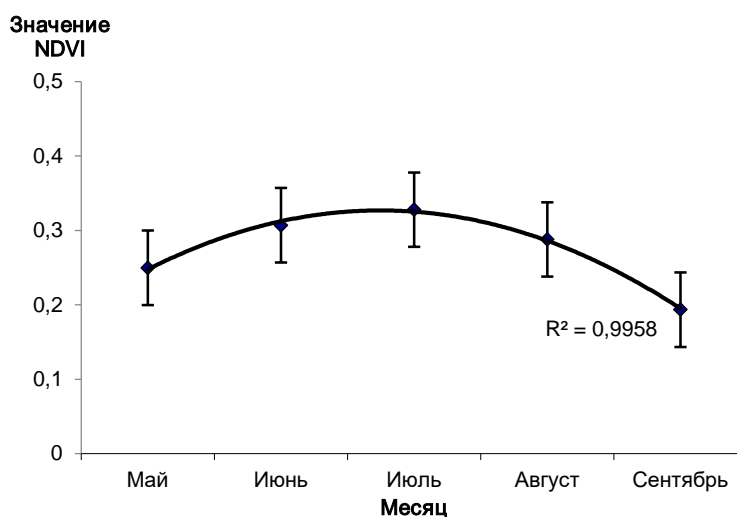


Рисунок 14 – Динамика NDVI в течение вегетационного периода 2017 года

Была исследована динамика индекса в течение вегетационного периода 2017 года. Для измерения параметра были использованы снимки Landsat-8. Максимальные значения NDVI зафиксированы в июле, что соответствует максимальному уровню солнечной инсоляции для данной территории. Самые низкие показания приходятся на конец сентября, который характеризуется

окончанием вегетационного периода. Следует отметить, что вегетационный период зоны средней тайги начинается с конца мая.

На гистограмме, на которой по оси абсцисс отложены показатели NDVI от -1 до 1, а по оси ординат количество пикселей.

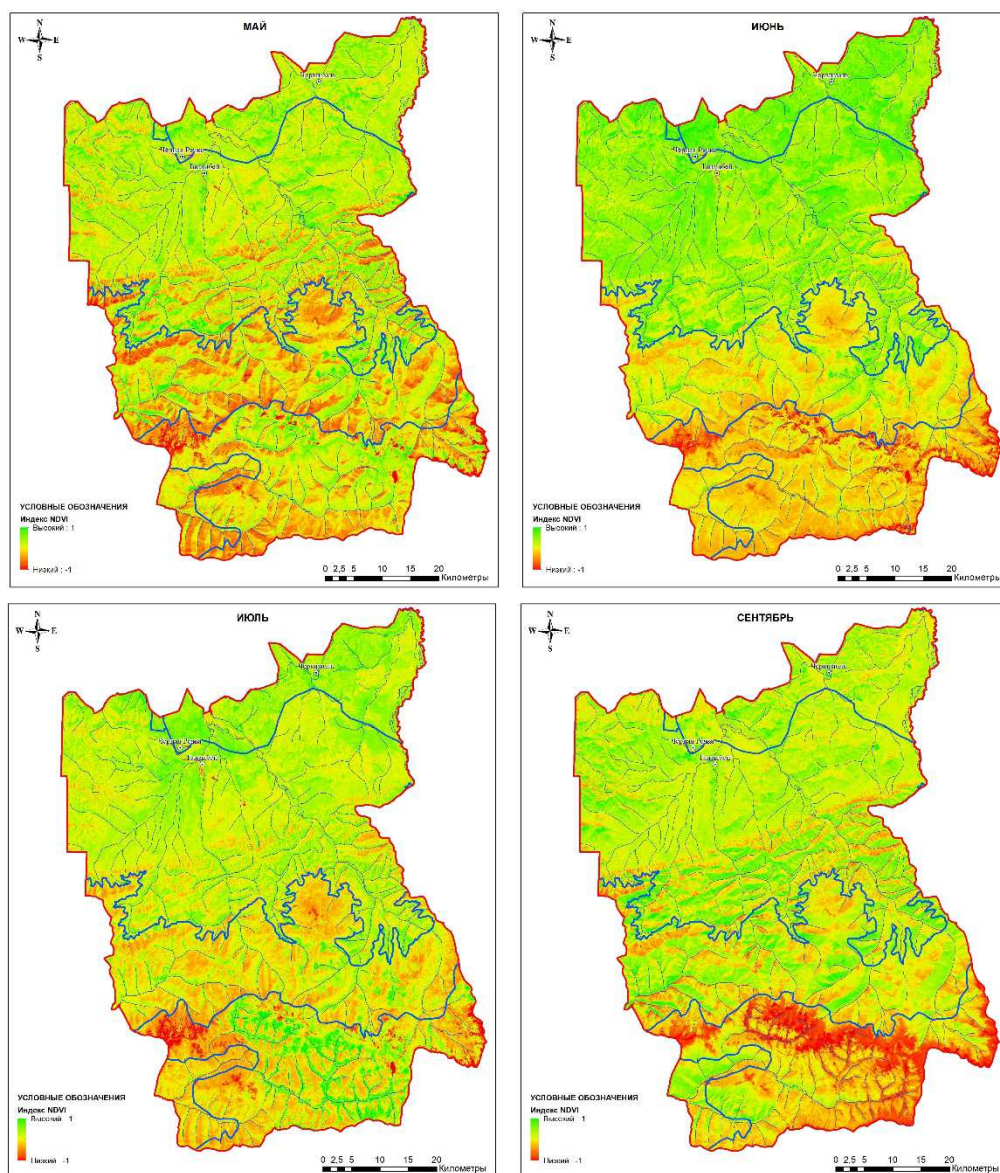


Рисунок 15 – картографическое представление сезонной динамики вегетирующей растительности с помощью индекса NDVI на территории Танзыбейского участкового лесничества

Так же данные градуированы цветом от красного к зеленому, показывающие минимальные и максимальные значения соответственно. Данные были

взяты с конца мая по середину сентября, что соответствует началу и концу вегетационного периода для данной территории.

Исходя из этого можно видеть, что в мае, начале вегетационного периода, большая часть полигона окрашена в желтый цвет, среднее значение NDVI около 0. В июле зафиксирован наибольший показатель индекса относительно площади, это самый активный период вегетационного периода.

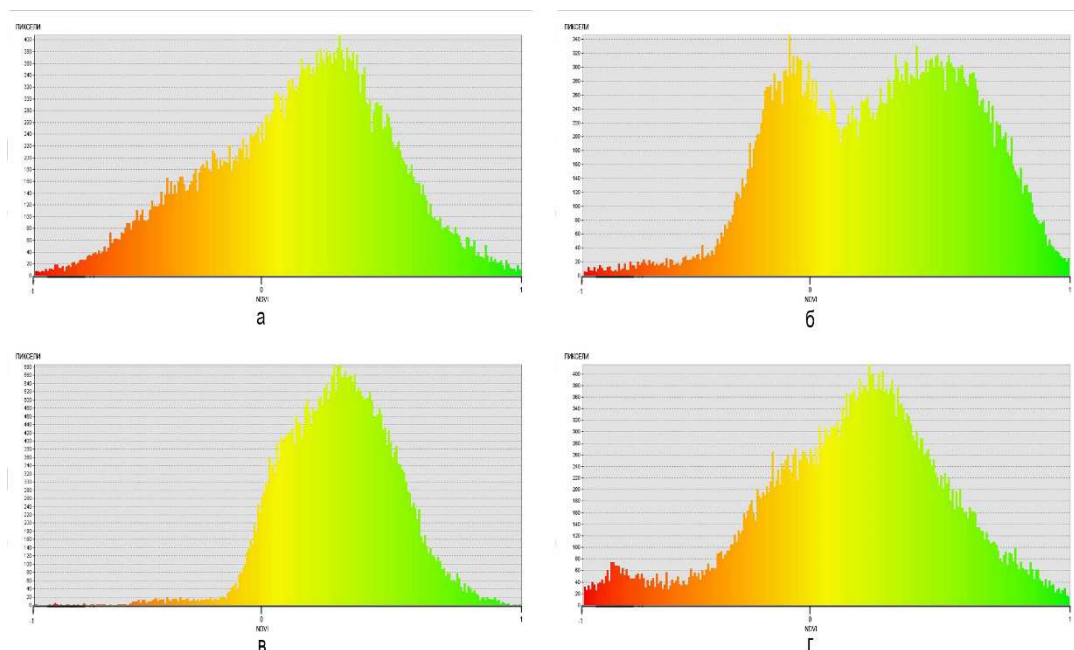


Рисунок 16 – Графическое представление сезонной динамики растительного покрова на основе индекса NDVI; а – май, б – июнь, в – июль, г – сентябрь

В ходе работы была предпринята попытка выявить уникальные спектральные параметры кедровых массивов, которые были исследованы при полевых работах, для их детектирования и дешифрирования. Сложность идентификации кедровых лесов заключается в их идентичных спектральных параметрах с другими темнохвойными и светлохвойными лесными массивами. Кроме того, крайне редко встречаются обширные лесные массивы, где преобладающей породой является кедр, зачастую эти леса смешанные, как на пробной площади 1 (Китаева гора), где также присутствуют сосна обыкновенная,

береза, осина, пихта. Поэтому в качестве эталонных участков были выбраны пробные площади 3,5 стационара «Ермаковский» с относительно чистыми по составу насаждениями кедра. Извлеченные спектральные параметры каналов RGB приведены на рисунке 7.

В качестве исходного снимка для дешифрирования были выбраны космоснимки со спутника Sentinel-2 ввиду их наилучшей разрешающей способности относительно других спутников (10 м.) и комбинация каналов – 2 (458 нм. –522 нм.), 3 (543 нм. –577 нм.) 4 (650 нм. –680 нм.), что соответствует «естественным цветам». В этой комбинации используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля – светлыми, нездоровая растительность – коричневой и желтой, дороги – серыми, береговые линии – белесыми.

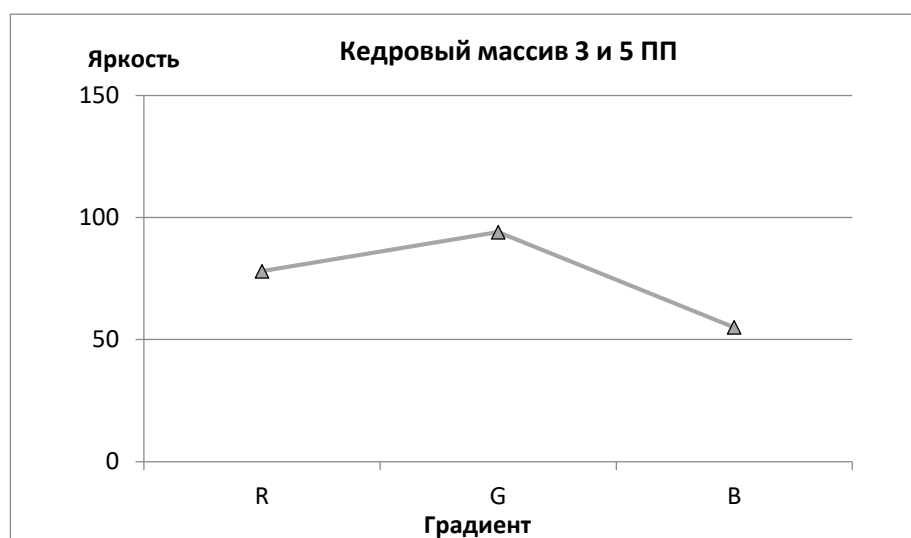


Рисунок 17 – Спектральные параметры кедровника на третьей и пятой пробных площадях

Опираясь на полученные данные о спектральных характеристиках, на этих полигонах при помощи программных продуктов Erdas IMAGINE и ArcGIS были выделены участки кедра на территории Танзыбейского участкового лесничества (рис.8)

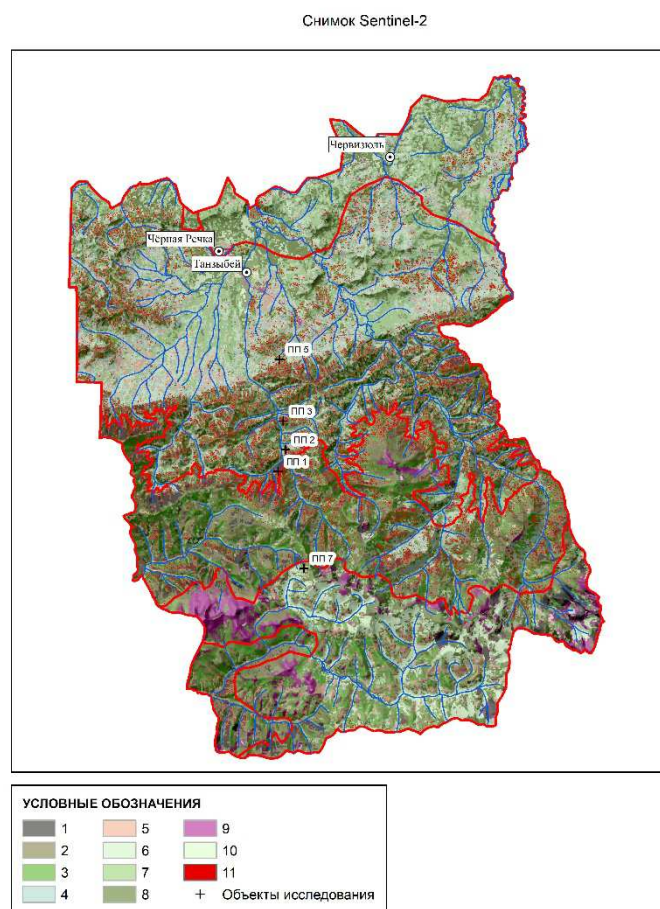


Рисунок 18 – Результаты выявления кедровых лесов на комоснимке
Sentinel-2

По результатам дешифрирования кедр было выявлено, что преобладающие площади кедр занимают на территории черногого ВПК (2), наиболее хорошо кедр выявляется на склонах северных и западных экспозиций. В горной тайге (ВПК 3) он занимает преимущественно нижние части склонов и встречается значительно реже. Для субальпийского ВПК (4) кедровые массивы трудно выявляемы ввиду различий черногого и субальпийского пояса по вегетационному состоянию и различным спектральным параметрам кедр.

ВЫВОДЫ

В ходе работы было проведено исследование и сделаны следующие выводы.

1. Выполнен анализ и сравнение материалов наземного исследования репрезентативных участков, с данными дистанционного зондирования. Выявлено, что наибольшая корреляция прослеживается с результатами работы со спутника Landsat-8.

2. Разработан метод тематического дешифрирования растительного покрова с помощью обучающих выборок. Подобраны уникальные параметры выявления кедровых массивов в черневом поясе с помощью методов дистанционного зондирования.

3. В ходе оценки эффективности применения спутниковой информации для изучения растительного покрова установлено, что наилучшим образом высотную зональность и ландшафтные характеристики территории исследования выявили данные со спутника Terra MODIS, в то же время его применение затруднено на локальном и региональном уровне ввиду низкого разрешения. На основании статистических данных спутники Sentinel-2 и Landsat-8 наилучшим образом детектировали типы растительности, однако учитывая низкий выбор космоснимков Sentinel-2 применение данных со спутников Landsat, которые доступны с 1970 года, представляется наиболее целесообразным.

4. Проведен мониторинг сезонно-фенологической динамики в 2017 году с помощью вегетационного индекса NDVI. Динамика индекса коррелирует с сезонно-фенологическими фазами активности растительного покрова, в том числе и в условиях высотной зональности, что говорит о его применимости при оценке сезонной и межсезонной динамике горной территории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бекмухамедов, Б. Э. Мониторинг нефтяных загрязнений на акватории каспийского моря методами дистанционного зондирования / Б. Э. Бекмухамедов, Л. А. Балакай, И. В. Каипов // Гидрометеорология и экология. – 2016. – № 2. – С. 114–124.
2. Дворкин, Б. А. Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel / Б. А. Дворкин // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 15–26.
3. Дворкин, Б. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б. А. Дворкин // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 16–36.
4. Геологическая служба США [Электронный ресурс] : база данных содержит информацию со спутников Landsat. – Режим доступа: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Загл. с экрана.
5. European Space Agency [Электронный ресурс] : база данных содержит информацию со спутников Sentinel – Режим доступа: <http://www.esa.int/ESA>. Загл. с экрана.
6. Кронберг, П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии / П. Кронберг – М.: Мир, 1988. – 343 с.
7. Пономарёв, Е. И. Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров / Е. И. Пономарёв, В. А. Иванов // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – № 3-4. – С. 307–311.
8. Кадочников, А. А. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов / А. А. Кадочников, В. Г. Попов, А. А. Токарев, О. Э. Якубайлик // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2008. – № 4. – С. 377–386.
9. Климченко, А. В. Аккумуляция органического вещества в крупном фитодетрите темнохвойных лесов средней тайги Приенисейской Сибири / А. В. Климченко // Хвойные бореальной зоны – 2011. – № 3-4. – С. 223–226.

10. Гиенко, А. Я. Геоинформационное картографирование и мониторинг изменения окружающей среды / Гиенко А. Я., Гиенко Г.А., Говоров М. О. // Сиббезопасность-Спассиб – 2012. – № 1. – С. 150–157.
11. Тутубалина, О. В. Изучение сезонной динамики растительности Кольского полуострова по снимкам Terra MODIS / О. В. Тутубалина // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 1. – С. 59-67.
12. Колесников, С. Г. Роскосмос – 15-й участник Международной хартии по космосу и крупным катастрофам / С. Г. Колесников, В. Н. Шумейко // Геоматика. – 2013. – № 3. – С. 14-16.
13. Кирилин, А.Н. Космический аппарат «Ресурс-П» / А. Н. Кирилин, А. И. Бакланов, Р. Н. Ахметов, В. М. Федоров, Н. Р. Стратилатов, М. В. Новиков // Геоматика. – 2010. – № 4. – С. 23-26.
14. Ямских, И. Е. Состояние ценопопуляций *Arsenjevia Baikalensis* в растительных сообществах Западного Саяна / И. Е. Ямских // Экология. – 2008. – № 4. – С. 261-268.
15. Энциклопедия Красноярского края. Юг. – Красноярск: Буква, 2008. – С. 1-592.
16. Климатологический справочник СССР. Красноярский край и Тувинская автономная область. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – Вып. 21а. – 211 с.
17. Грибов А. И. Средообразующая роль лесных экосистем юга Средней Сибири. – Абакан: Изд-во Хакас. Ун-та, 1997. – 160 с.
18. 2. Ермоленко П. М., Овчинникова Н. Ф. Стационарные лесоводственные исследования в темнохвойных лесах Западного Саяна // Лесные стационарные исследования: методы, результаты, перспективы. – Тула: Гриф и К°, 2001. – С. 221–22
19. Типы лесов гор Южной Сибири / В. Н. Смагин, С. А. Ильинская, Д. И. Назимова, И. Ф. Новосельцева, Ю. С. Чередникова. Новосибирск, «Наука», 1980. - 336 с.
20. Силаков, М. Б. Кабарга (*Moschus moschiferus* L., 1758) в Ермаковском районе Красноярского края (Западный Саян) / М. Б. Силаков, М. Н.

Смирнов, Е.А. Еременко // Горные экосистемы Южной Сибири: изучение, охрана и рациональное природопользование: тр. гос. заповед. «Тигирекский».- Барнаул, 2005.- Вып. 1. - С.341-344.

21. Назимова, Д. И. Проблемы и перспективы сохранения популяции черневого кедра (*Pinus sibirica* Du Tour) в Западном Саяне / Д. И. Назимова, Д.М. Исмаилова // Горные экосистемы Южной Сибири: изучение, охрана и рациональное природопользование. Труды Тигирекского заповедника. Вып. 3. Барнаул, 2010. - С. 147-151.

22. Назимова, Д. И. Основные высотно-поясные подразделения лесного покрова в горах Южной Сибири и их диагностические признаки / Д. И. Назимова, И.А. Коротков, Ю.С. Чередникова // Структура и функционирование лесных биогеоценозов Сибири. – М.: Наука, 1987. - С. 30-67.

23. Зуева, К. Г. Почвы горных кедровников Средней Сибири / К. Г. Зуева // – М.: Наука, 1980. – 171 с.

24. Елдышев, Ю. Н., Изменение климата: последствия и противодействия / Ю. Н. Елдышев // Экология и жизнь. – 2007. - № 10. – 44-50 с.

25. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L., Eds.; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2014. - 190 p.

26. Школьник, И. М. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI век: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО / И. М. Школьник, В. П. Мелешко, С. В. Ефимов, Е. Н. Стафеева // Метеорология и гидрология. - 2012. - №2. – С. 5 – 22.

27. Onuchin, A. Modeling air temperature changes in Northern Asia / A. Onuchin, M. Korets, A. Shvidenko, T. Burenina, A. Musokhranova // *Global and Planetary Changes – USA – 2014*. 122. – P. 14–22.
28. Rehfeldt, G. E. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems / G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, C. Sáenz-Romero // *Ecological Manage.* – 2012. – 22(1). – P. 119–141.
29. Kharuk, V.I. Forest–tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia / V.I. Kharuk, S.T. Dvinskaya // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2010. – Vol. 25. – Iss. 3. – P. 224 – 233.
30. Виноградов, Б. В. Результаты комплексной интерпретации космических изображений / Б. В. Виноградов. – т.3. Москва, 1974. – 92 с.
31. Братков, В. В. Теоретические и методические вопросы картографирования линейной эрозии почв / В. В. Братков, В. В. Волчкова // *Экологические проблемы. Взгляд в будущее*. - 2015. - 58 с.
32. Кузнецова, Э. А. Картографирование линейных объектов / Э. А. Кузнецова, А. А. Бакланов // *Материалы VI международной научно-практической конференции*. - 2017. - 76 с.
33. Боков, В. А. Статистическая природа ландшафтных систем / В. А. Боков // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского*. - 2014. – № 1. – С. 3-10.
34. Исаченко, А. Г. Ландшафты России: экологический потенциал и устойчивость к антропогенным воздействиям / А. Г. Исаченко // *Информационный бюллетень РФФИ*. - 1996. – № 14. – 87 с.
35. Мельниченко, Н. И. Изображение территориальных структур географических систем способом изолиний / Н. И. Мельниченко, Е. М. Мазурова, Н. Р. Руденя // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. - 2003. – № 1. – С. 105-114.
36. Киселева, Л. Л. Модель оптимизации охраны флористического разнообразия орловской области с использованием ГИС-технологий / Л. Л. Кисе-

лева // Ученые записки Орловского государственного университета. серия: естественные, технические и медицинские науки - 2013. – № 6. – С. 99-103.

37. Нешатаев, М. В. Картографирование растительности для кадастровой оценки земель особо охраняемых природных территорий на примере Лапландского заповедника / Нешатаев М. В., Нешатаев В. Ю. // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук - 2012. – № 6. – С. 1630-1633.

38. Симакова, М. С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам / М. С. Симакова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева - 2014. – № 74. – С. 3-19.

39. Макаров, В. З. Эколого-географическое картографирование городов / В. З. Макаров, Б.А. Новаковский, А.Н. Чумаченко // М.: Научный мир. 2002. 140 с.

40. Герасимова, М. И. Мелкомасштабное почвенное картографирование :учеб. пособие / М. И. Герасимова, И. П. Гаврилова, М. Д. Богданова // Под ред. Л. Ф. Январёвой. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. – 119 с.

41. Николаева, О. Н. Некоторые аспекты создания карт экологического разнообразия территории / О. Н. Николаева // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 75–80.

42. Стурман, В. И. К изучению и картографированию экологически значимых свойств горных пород / В. И. Стурман // Вестник Удмуртского университета. Науки о Земле - 2017. – № 3. – С. 403-408.

43. Интерфейс EO Browser [Электронный ресурс]: база данных содержит информацию со спутников Sentinel-2 – режим доступа: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Загл. с экрана.

44. Интерфейс SedAs [Электронный ресурс]: база данных содержит информацию со спутников Landsat, Sentinel-2 – режим доступа: <https://geobrowser.satapps.org>. Загл. с экрана.

45. Геологическая служба США [Электронный ресурс]: база данных содержит информацию со спутников Landsat – режим доступа: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Загл. с экрана.

46. Шевяков, А. В. Модели в управлении качеством аэрокосмических информационных систем // Избранные труды Четырнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством», 11-12 марта 2015 года / ФГБОУ ВПО «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского». - М.; ПРОБЕЛ-2000, МАТИ, 2015. - С. 427-432.

47. Iskhakov, A. R. Mathematical methods of modeling of image processing and analysis in the modified descriptive algebras of images / Journal of Computational and Engineering Mathematics. - 2016. - Vol.3, No.1. - P.3-9.

48. Барталёв, С. А. Автоматизированное уточнение площадей, пройденных лесными пожарами, по данным приборов HRV, HRVIR / С. А. Барталёв, А. А. Златопольский, А.А. Галлеев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 335–342.

49. Martinde Graaf. Remote Sensing of UV – Absorbing Aerosols Using Space-borne Spectrometers. Netherlands, Vrije Universiteit, 2006, - 21 p.

50. Кусов, А. Л. Исследования оптических спектральных характеристик облачных образований различного класса по результатам измерений вдоль трассы полёта Международной космической станции / А. Л. Кусов, Д. А. Пахомов, Ю. А. Пластинин и др. // Космонавтика и ракетостроение, 2010, вып. 2(59). - С. 156 – 165.

51. ERDAS Imagine Field Guide. Intergraph. 2013. Electronic edition. URL: <http://e2b.erdas.com/products/erdas-imagine/ProductLiterature.aspx>

52. Nazimova, D.I. Identification and mapping of altitudinal belt classes of land cover with use of NOAA/AVHRR imagery / D.I. Nazimova, E.I. Ponomarev, E.V. Fedotova // Remote researches and mapping of geosystems structure and dynamics. Novosibirsk: SB RAS, - P. 76-81.

53. Назимова Д.И. Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования / Д.И. Назимова, Е.И. Пономарев, Н.В. Степанов, Е.В. Федотова // Лесоведение. – 2005. - 1: 12-18.
54. Mucina L. Classification of vegetation: Past, present and future / Mucina L. // *Jornal of vegetation Science*. - 1997. - V.8. - P.751-760.
55. McRober R. E. A model-based approach to estimating forest area / R. E. McRober // *Remote Sensing of Environment*. - 2006. - № 103. - P. 56-66.
56. Tomppo E. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases / E. Tomppo, H. Olsson, G. Stahl, M. Nillson, O. Hagner, M. Katila // *Remote Sensing of Enviroment*. 2008. V. 112. N5. P. 1982-1999.
57. Ершов, Д. В. Диагностика современного сукцессионного состояния лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника по спутниковым тематическим продуктам / Д. В. Ершов, В.С. Бурцева, Е. А. Гаврилюк, Н. В. Королева, А. А. // *Лесоведение*, 2017. - № 5. - С. 1–12
58. Johansen B. Monitoring vegeatioon changes on Finnmarksvidda, Northen Norway, using Landsat MSS and Landsat TM/ETM plus satellite images / Johansen B. // *Phtocoenologia*. - 2005. V. 35. - № 4. - P 969–984.
59. Grieg-Smith P. The development of numerical classification and ordination / Grieg-Smith P. // *Vegetation*. - 1980. V. 42. - № 1. - P. 1–9.
60. McRober R.E. A model-based approach to estimating forest area / McRober R.E. // *Remote Sensing of Enviroment*. - 2006. № 103. P. 56–66.
61. Rivas-Martinez S. Notions on dynamic-catenal phytosociology as a basis of landscape science / Rivas-Martinez S. // *Plant Biosystems*. - 2005. V. 139. № 2. - P. 135–144.
62. Kent M. Vegetation description and data analysis: a practical approach. / Kent M. // 2nd es. Chichester: Wiley-Blacwell, 2012. - 415 p.
63. Tuhkanen S. A circumboreal system of climatic-phtytogeographical regions / Tuhkanen S. // *Acta Bot. Fenn*. - 1984. V. 127. - P. 1–50.

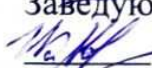
64. Mucina L. Classification of vegetation: Past, present and future / Mucina L. // *Journal of Vegetation Science*. - 1997. V. 8. - P. 443–470.
65. Feoli E. The logical basis of syntaxonomy in vegetation science / Feoli E., Lausi D. // *Syntaxonomie* / Ed. H. Dierchke. Vaduz: J. Cramer, 1981. - P. 35–42.
66. Johansen B. Vegetation Mapping of Norway and Northern Scandinavia Using Satellite Data / Johansen B. // *Proceedings of the Fourth International Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Flora Group Workshop, 15–18 May 2007, Faroe Islands. CAFF Technical Report №15* / Ed. S.S. Talbot. Akureyri, 2008. - P. 89–90.
67. Bailey R.G. Ecoregions of the Continents / Bailey R.G. // Washington: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1995. – P. 20–22.
68. Bailey R.G. Identifying Ecoregion Boundaries / Bailey R.G. // *Environmental Management*. - 2005. V. 34. № 1. - P. 14–26.
69. Blasi C. Biodiversity and climate / Blasi C., Michetti L. // *Biodiversity in Italy. Contribution to the National Biodiversity Strategy* / Eds C. Blasi, L. Boitani, S. La Posta, F. Manes, M. Marchetti. Rome: Plombi Editori, 2005. - P. 57–66.
70. Blasi C. Vegetation science and the ecoregional approach: a proposal for the ecological land classification of Italy / Blasi C., Capotorti G. // *Fitosociologia*. - 2011. V. 48. № 2. Suppl. 1. - P. 75–82.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт экологии и географии
Кафедра экологии и природопользования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И.Н. Безкоровайная

подпись

« 18 » 06 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Сравнительный анализ картографирования лесного покрова спутниковыми и
наземными методами на примере горной территории

05.03.06 - экология и природопользование

05.04.06.05 – Экология северных нефтегазоносных провинций

Руководитель, канд. техн. наук  18.06.18 Е.И. Пономарев
подпись, дата инициалы, фамилия

Выпускник, ЭБ16-05М  18.06.18 А.А. Карсаков
номер группы подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент д-р биол. наук  18.06.2018 Д.И. Назимова
подпись, дата

Нормоконтролер  18.06.18 О.С. Бухно
подпись, дата инициалы, фамилия

Красноярск 2018